

S. A. 365

N° d'ordre :

1294

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS

Pour obtenir le grade de Docteur ès sciences physiques

PAR

M. JULIEN LOISEL

1^{re} THÈSE. — 1° Recherches sur les Relations des phénomènes solaires avec la quantité de chaleur reçue à la surface du sol; 2° Variation annuelle de la quantité de chaleur que nous envoie le Soleil; 3° Quantité de chaleur reçue dans le cours de l'année.

2^e THÈSE. — Propositions données par la Faculté : Les Gaz de l'air.

SOUTENUES LE 2 AVRIL 1908 DEVANT LA COMMISSION D'EXAMEN

MM. LIPPMANN, Président.

BOUTY

VIOLE

MATIGNON

} Examineurs.

PARIS

IMPRIMERIE DE LA COUR D'APPEL

L. MARETHEUX, Directeur

1, RUE CASSETTE, 1

1908

S. A. 565
N° d'ordre :
1294

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS

Pour obtenir le grade de Docteur ès sciences physiques

PAR

M. JULIEN LOISEL

1^{re} THÈSE. — 1° Recherches sur les Relations des phénomènes solaires avec la quantité de chaleur reçue à la surface du sol; 2° Variation annuelle de la quantité de chaleur que nous envoie le Soleil; 3° Quantité de chaleur reçue dans le cours de l'année.

2^e THÈSE. — Propositions données par la Faculté : Les Gaz de l'air.

SOUTENUES LE 2 AVRIL 1908 DEVANT LA COMMISSION D'EXAMEN



MM. LIPPMANN, Président.

BOUTY	} Examinateurs.
VIOLE	
MATIGNON	

PARIS

IMPRIMERIE DE LA COUR D'APPEL

L. MARETHEUX, Directeur

4, RUE CASSETTE, 4

1908

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

MM.

Doyen P. APPELL, *professeur*. Mécanique rationnelle.
Doyen honoraire . . . G. DARBOUX — Géométrie supérieure.

Professeurs honoraires. { L. TROOST.
 CH. WOLF.
 J. RIBAN.

Professeurs { LIPPMANN Physique.
 BOUTY Physique.
 BOUSSINESQ . . . Physique math. et calcul des probabilités.
 PICARD Analyse supérieure et algèbre supérieure.
 H. POINCARÉ. . . Astronomie mathém. et mécanique céleste.
 Y. DELAGE Zoologie, anatomie, physiologie comparée.
 G. BONNIER . . . Botanique.
 DASTRE Physiologie.
 DITTE Chimie.
 GIARD Zoologie, Évolution des êtres organisés.
 KOENIGS Mécanique physique et expérimentale.
 VÉLAIN Géographie physique.
 GOURSAT Calcul différentiel et calcul intégral.
 CHATIN Histologie.
 PELLAT Physique.
 HALLER Chimie organique.
 JOANNIS Chimie (Enseignement P. C. N.)
 JANET Physique — —
 WALLERANT. . . Minéralogie.
 ANDOYER Astronomie physique.
 PAINLEVÉ Mathématiques générales.
 HAUG Géologie.
 TANNERY Calcul différentiel et calcul intégral.
 RAFFY Application de l'analyse à la géométrie.
 HOUSSAY Zoologie.
 LE CHATELIER. . Chimie.
 N. Chimie biologique.
 N. Zoologie, anatomie, physiologie comparée.
 N. Physique.

Professeurs-adjoints. { PUISEUX Mécanique et astronomie.
 LEDUC Physique.
 HADAMARD . . . Calcul différentiel et calcul intégral.
 MATRUCHOT . . . Botanique.
 MICHEL Minéralogie.
 DAGUILLON . . . Botanique.
 BOUVEAULT . . . Chimie organique.
 BOREL Théorie des fonctions.
 G. PRUVOT. . . . Anatomie comparée.
 CAULLERY Zoologie. Évolution des êtres organisés.

Secrétaire. A. GUILLET.

A

MONSIEUR E. MAMELLE

DIRECTEUR AU MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE

A

MONSIEUR J. VIOLLE

MEMBRE DE L'INSTITUT

*Hommage
respectueux et reconnaissant.*

J. LOISEL.

A MA FEMME

MADAME THÉRÈSE LOISEL

*En témoignage
de notre profonde affection.*

J. LOISEL.

PREMIÈRE THÈSE

RECHERCHES

SUR LES

RELATIONS DES PHÉNOMÈNES SOLAIRES

AVEC LA QUANTITÉ DE CHALEUR

REÇUE À LA SURFACE DU SOL

Introduction.

Le disque du Soleil, examiné avec un grossissement convenable, apparaît recouvert d'une multitude de nodules ou petits grains brillants séparés par des interstices qui forment un réseau plus sombre. Cette surface est parsemée de plages irrégulières plus brillantes que l'on nomme *facules*, au milieu desquelles on aperçoit ordinairement des *taches* présentant les formes les plus variables et qui sont composées d'un *noyau* sombre entouré, presque toujours, d'une *pénombre* à contours assez bien limités. Enfin, pendant les éclipses totales de Soleil, quand cet astre est entiè-

rement recouvert par la Lune, on distingue des éruptions ayant la forme de jets ou de panaches et qui bordent irrégulièrement le disque éclipsé : ce sont les *protubérances*.

Facules, taches et protubérances sont autant de manifestations de l'activité solaire.

L'état de la surface solaire n'est pas constant et l'on a remarqué, depuis longtemps, qu'il présente des fluctuations continuelles soumises dans leur fréquence et leur importance à des oscillations périodiques dont les causes ne nous sont pas encore exactement connues, mais qui sont liées vraisemblablement aux causes générales qui assurent la permanence du rayonnement solaire.

Les taches solaires, en particulier, sont régies dans leur ensemble par une loi simple et générale : en *moyenne*, elles augmentent progressivement pendant quatre ans et demi, restent un certain temps stationnaires, puis diminuent pendant environ six ans et demi pour recommencer ensuite un cycle analogue de variations.

Le soleil n'est d'ailleurs pas la seule étoile offrant de semblables variations.

La courbe lumineuse de γ Aigle, par exemple, présente une montée vers le maximum plus rapide que la descente vers le minimum, et ses périodes de minimum à minimum varient en longueur.

Ajoutons enfin que, d'après les documents recueillis à l'heure actuelle sur les facules et les protubérances, on peut dire que chacun de ces phénomènes offre aussi, dans son ensemble, une oscillation générale parallèle à celle des taches.

Le Soleil étant incontestablement la source première de toutes les énergies terrestres et, en particulier, des phénomènes dont notre atmosphère est le siège, on a été naturellement amené à rechercher si les variations périodiques que l'on observe à sa surface n'ont pas une répercussion sur le régime météorologique de notre globe.

La première idée d'une connexion possible entre la météo-

rologie terrestre et l'état du Soleil paraît avoir été émise en 1801 par W. Herschel, alors qu'on ne connaissait encore que le seul phénomène des taches. « Pour ce qui est de la concordance des taches avec la rigueur ou la douceur des saisons, écrivait-il, il est à peine nécessaire de faire remarquer que nous n'avons rien de décisif à ce sujet. Nous trouvons cependant des éléments pour résoudre la question d'une façon indirecte, il est vrai, dans l'influence des rayons solaires sur la végétation et la culture du froment dans notre pays. N'y a-t-il pas là un critérium certain de la quantité de lumière et de chaleur émises par le Soleil, puisque le prix du blé représente exactement la rareté ou l'abondance de sa production absolue dans notre région ?

« En examinant la période comprise entre 1650 et 1713, il semble probable, d'après le cours normal du blé, qu'il se produisait une rareté ou un défaut temporaire de la végétation en général, quand le Soleil n'avait pas de taches ; ces apparences seraient donc les symptômes d'une émission abondante de lumière et de chaleur.

« Aux agriculteurs et aux botanistes qui pourraient me répondre que le blé pousse dans des climats plus froids et qu'une distribution appropriée d'humidité et de sécheresse a probablement beaucoup plus d'importance que la quantité absolue de lumière et de chaleur venant du Soleil, je ferai observer que ces circonstances réelles d'alternances appropriées d'humidité, de sécheresse, de vent, etc., favorables à la végétation peuvent fort bien dépendre de la quantité de rayons solaires qui nous sont envoyés (1). »

Mais, à l'époque où W. Herschel émettait cette opinion, la loi qui régit les taches dans leur apparition à la surface solaire échappait encore aux astronomes. Ce n'est qu'au milieu du xix^e siècle, après que Schwabe eut publié sa table de fréquence des taches, que l'on trouve la première indication sur l'existence probable d'une similitude entre le

(1) *Phil. Trans.*, 1801, p. 265.

cycle des taches solaires et les phénomènes terrestres.

En 1851, Lamont reconnaît, en effet, que l'amplitude de l'oscillation diurne de l'aiguille aimantée offre une variation périodique dont la durée est voisine de onze ans et demi (1), et il se montre disposé à croire à l'existence d'une relation entre le Soleil et la Terre. Mais Sabine, plus prudent, fait remarquer qu'il est nécessaire, pour que l'on puisse considérer la connexion comme réelle, que la comparaison porte sur une plus longue série d'observations.

Le critérium demandé par Sabine a été établi par toutes les observations postérieures.

A partir de cette époque les recherches se multiplient et s'étendent peu à peu aux divers éléments météorologiques.

En 1867, Baxendell remarque que la variation de la température moyenne de l'air, d'une année à l'autre, est en rapport avec la période des taches (2).

En 1872, Meldrum annonce que la courbe de fréquence des cyclones dans les régions tropicales est analogue à celle du nombre des taches (3).

En 1873, Poëy trouve que les orages dans les Indes occidentales sont en relation avec le phénomène de l'apparition des taches (4).

La même année, Köppen reconnaît que, dans les régions équatoriales, les années les plus chaudes correspondent aux années de minimum des taches et que les années les plus froides sont celles où le Soleil a le plus de taches (5).

En 1874, Lockyer signale qu'à Ceylan la quantité de pluie s'accorde avec la variation des taches solaires (6).

En 1880, Chambers conclut, dans son « Rapport sur la météorologie de l'Inde occidentale », qu'il y a une relation

(1) *Poggendorff's Amalen*, décembre 1851.

(2) *Memoirs of the Manchester Lit and Phil. Soc.*, 3^e série, vol. IV, p. 128.

(3) *Nature*, vol. VI, p. 357.

(4) *C. R.*, 24 nov. 1873, p. 1222.

(5) *Zeitschrift für Meteorologie*, Band VIII, p. 241 et 257.

(6) *Solar Physics*, 1874, p. 425.

intime entre les variations des taches, de la pression barométrique et de la pluie dans cette région.

En 1893, Gonzalez constate que, depuis 1610, dans les régions tropicales, les années de sécheresse sont groupées autour des époques de minima des taches et les périodes pluvieuses autour des maxima (1).

En 1894, Savélief indique que l'on peut admettre avec une grande probabilité que l'intensité calorifique de la radiation solaire augmente avec l'activité des phénomènes qui se produisent à la surface du Soleil, celle-ci étant caractérisée par l'accroissement du nombre des taches (2).

Enfin, en 1902, Nordmann conclut que l'effet des taches solaires est de diminuer la température moyenne terrestre, de sorte que la courbe qui représente la variation de celle-ci est parallèle à la courbe inversée des taches (3).

Tels sont, très brièvement énumérés, les principaux travaux effectués pour faire ressortir l'existence d'un Rapport général entre les changements solaires et la météorologie terrestre.

Parmi les plus intéressants, il faut citer celui de Savélief. Malheureusement il porte sur une période de temps beaucoup trop restreinte pour que les conclusions fournies puissent être acceptées sans contestation. En concluant même à leur réalité pour le centre du continent européen, rien ne nous permet de les regarder comme valables pour le midi de la France. Aussi m'a-t-il paru nécessaire de reprendre et d'élargir le problème. C'est ce que j'ai fait dans la première partie de ce travail.

J'ai étudié ensuite comment varie dans le cours de l'année la quantité de chaleur que nous recevons du Soleil.

Enfin j'ai cherché à évaluer la quantité totale reçue annuellement.

Les éléments de ce travail m'ont été fournis par les

(1) Institut de Colombie ; janvier 1893.

(2) *C. R.*, t. CXVIII, p. 62.

(3) *Revue Gén. des Sc.*, 1902, p. 381.

mesures actinométriques effectuées à Montpellier pendant une période non interrompue de dix-huit années (1883-1901) et publiées au *Bulletin annuel de la Commission météorologique du département de l'Hérault*.

Méthode d'évaluation de la quantité de chaleur reçue par le sol.

Une évaluation complète du rayonnement solaire nécessiterait la triple mesure de l'intensité calorifique, de la puissance lumineuse et de l'énergie chimique pour chacune des radiations simples dont est composé ce rayonnement.

On peut toutefois simplifier les mesures en remarquant que, pour chaque radiation, les trois intensités calorifique, lumineuse et chimique restent entre elles dans des rapports constants, caractéristiques de la radiation considérée, de telle sorte que, si l'intensité de cette radiation éprouve une variation, les trois formes d'énergie sous lesquelles elle se manifeste varieront elles-mêmes proportionnellement.

Une seule détermination de l'intensité totale calorifique, lumineuse, ou chimique du rayonnement solaire suffira donc pour nous fixer sur la valeur de ce rayonnement.

Des recherches ont été effectuées dans ces trois voies, mais c'est principalement sous forme de chaleur que l'énergie solaire a été mesurée et c'est celle que nous considérerons dans ce qui suit.

Malheureusement on ne dispose ordinairement que d'observations effectuées d'une façon discontinue dans le cours de la journée, le plus souvent même que d'une seule détermination quotidienne, de sorte que l'évaluation de la quantité de chaleur totale reçue pendant cet intervalle de temps ne semble, *a priori*, pas possible.

Le problème a été résolu d'une façon approchée par M. Savélief :

« J'ai construit, dit-il, les courbes des variations diurnes

de l'intensité calorifique reçue sur 1 centimètre carré de surface horizontale du sol (c'est-à-dire les intensités absolues multipliées par le cosinus de la distance zénithale du soleil); en prenant pour axe des y l'ordonnée de midi et pour axe des x l'axe des temps, j'ai remarqué que si dans l'angle yOx on trace un rayon vecteur quelconque faisant un angle ω avec l'axe des x , en désignant par R_ω et r_ω les longueurs du rayon vecteur interceptées par deux courbes, l'augmentation du rapport $\frac{r_\omega}{R_\omega}$ des deux longueurs du rayon vecteur interceptées par deux courbes est proportionnelle, à un centième près, au rapport de l'angle ω à 90° ; c'est-à-dire que si R_{90} et r_{90} sont les deux rayons vecteurs dans la direction de l'axe des y ($\omega = 90^\circ$), R_0 et r_0 les longueurs de ces deux mêmes rayons vecteurs suivant l'axe des x ($\omega = 0^\circ$), on a la relation :

$$\frac{r_\omega}{R_\omega} - \frac{r_0}{R_0} = \left(\frac{r_{90}}{R_{90}} - \frac{r_0}{R_0} \right) \frac{\omega}{90^\circ}.$$

« D'après cela, en partant d'un certain nombre de courbes construites au moyen de séries bien régulières d'observations, pour des journées différentes, on pourra déduire de l'intensité calorifique observée pour d'autres journées à midi seulement, la quantité totale de calories reçues pendant ces journées sur 1 centimètre carré de la surface horizontale du sol. »

La méthode proposée par M. Savélieff exige que l'on possède des séries d'observations bien régulières. Or, celles-ci ne se produisent que si un ensemble de circonstances atmosphériques favorables se trouve réalisé, ce qui est bien rare sous nos climats.

A Montpellier, il n'a été effectué, presque toujours, qu'une observation par jour.

Il y avait donc lieu de commencer par rechercher une méthode générale qui permit de déduire immédiatement, d'une seule valeur de l'intensité calorifique de la radiation

solaire observée à une heure QUELCONQUE, la quantité de chaleur reçue à la surface du sol pendant un jour ou une période donnée de l'année. C'est ce que j'ai fait.

L'expérience apprend que l'intensité calorifique de la radiation solaire augmente, quand l'épaisseur atmosphérique traversée diminue et la transparence augmente.

Dans son excellente monographie sur l'actinométrie (1), M. Radau a montré que la marche de la radiation totale pendant une même journée peut être suivie avec un égal succès par les formules les plus diverses. Hâtons-nous cependant d'ajouter que ces formules ne doivent être considérées que comme des formules empiriques, s'adaptant numériquement aux observations, et qu'elles n'ont aucun rapport avec l'équation qui pourrait représenter théoriquement cette variation, et dont la forme nous est inconnue.

J'ai fait usage de la formule employée par M. Crova, pour représenter ses observations, parce qu'elle se prête assez aisément au calcul.

En figurant graphiquement ses observations, les quantités de chaleur étant prises pour ordonnées, et les masses d'air pour abscisses, M. Crova a constaté que, dans les séries les plus remarquables par leur netteté, la sous-tangente aux courbes ainsi tracées varie proportionnellement à l'épaisseur. Cette particularité lui a permis de déterminer la nature de la courbe (2).

Soit y la quantité de chaleur qui parvient pendant l'unité de temps, sur une surface de 1 centimètre carré normale à la direction des rayons incidents, x l'épaisseur atmosphérique traversée, s la sous-tangente. On a :

$$s = c + mx,$$

c et m étant deux constantes.

(1) RADAU : *Actinométrie*.

(2) *C. R.*, t. LXXXI, p. 4205. — *Annales de Ch. et de Phy.*, 5^e série, t. XI, p. 443, et t. XIX, p. 167. — *Bulletins météorologiques du Département de l'Hérault*, 1885-1886.

L'équation différentielle de la courbe est donc :

$$\frac{y}{\frac{dy}{dx}} = -(c + mx),$$

et, par intégration :

$$y = \frac{C}{(1 + ax)^p}, \quad (1)$$

a et p représentant deux facteurs ayant respectivement pour valeur $\frac{m}{c}$ et $\frac{1}{m}$, et C une autre constante.

M. Crova a trouvé que l'exactitude de la formule précédente n'est pas diminuée, et que celle-ci s'accorde aussi bien avec l'observation, si l'on pose $c = m$, ce qui donne $a = 1$.

La relation précédente se réduit ainsi à la suivante :

$$y = \frac{C}{(1 + x)^p},$$

qui ne renferme plus que deux constantes : C et p (1).

La Terre étant supposée à la distance r du Soleil, la quantité de chaleur q qui parvient pendant l'unité de temps sur l'unité de surface d'un sol horizontal et pour une hauteur h du soleil au-dessus de l'horizon, est liée à celle reçue normalement y , d'après la loi de Lambert, par l'expression :

$$q = \frac{y}{r^2} \sin h.$$

La variation de cette quantité pendant le temps dt sera :

$$dq = \frac{y}{r^2} \sin h \, dt.$$

On obtiendra la quantité de chaleur reçue en un jour sur l'unité de surface d'un sol horizontal, en intégrant cette relation entre les limites convenables.

(1) C. R., t. CIV.

On aura, par conséquent, en désignant par $\mp t_0$ l'heure du lever et du coucher du Soleil :

$$Q = \frac{C}{r^2} \int_{-t_0}^{+t_0} (1+x)^{-p} \sin h \, dt = \frac{CI}{r^2} \quad (2)$$

en représentant, pour abrégér, par I l'intégrale.

Le calcul direct de l'intégrale I ne paraît pas possible. Pour arriver au résultat numérique, j'ai employé la méthode suivante : J'ai construit la courbe ayant pour abscisses les temps, et pour ordonnées les valeurs horaires de $\frac{C}{r^2} (1+x)^{-p} \sin h$. Les aires de ces courbes représentent des quantités proportionnelles aux quantités de chaleur reçues par le sol pendant le temps correspondant. Pour transformer ces nombres en calories, il suffit alors de connaître l'équivalent calorifique de 1 millimètre carré de surface, par exemple. Supposons, pour fixer les idées, que, dans le tracé graphique des courbes, chaque heure corresponde à une abscisse de n millimètres, et que chaque calorie ait été représentée par une ordonnée de m millimètres.

Une surface de $m \times n$ millimètres carrés représente :

$$1 \text{ cal.} \times 60 = 60 \text{ calories,}$$

et, par conséquent, 1 millimètre carré équivaut à :

$$\frac{60 \text{ cal.}}{m \times n} = N \text{ calories.}$$

En multipliant par N les aires trouvées, on obtient la quantité de chaleur correspondante.

Un semblable travail effectué pour chacun des jours d'une période de 18 années serait extrêmement long et pénible. Or, le but que je me propose n'étant pas d'établir la *variation détaillée* de la chaleur reçue par la Terre, mais seulement son *allure générale*, je me suis contenté de déterminer cette quantité pendant la durée d'un jour moyen mensuel,

en attribuant aux éléments de la formule (2), au lieu de leurs valeurs numériques quotidiennes, leurs valeurs moyennes mensuelles.

CALCUL DES ÉLÉMENTS DE L'EXPRESSION : $\frac{C}{r^2}(1+x)^{-p} \sin h$.

1° *Calcul de sin h*. — La valeur de $\sin h$ a été déterminée en partant de la formule connue :

$$\sin h = \sin \lambda \sin \delta + \cos \lambda \cos \delta \cos t,$$

dans laquelle λ représente la latitude du lieu d'observation, δ la déclinaison du Soleil, et t l'angle horaire.

J'ai posé $\lambda = 43^{\circ}47'$, latitude de Montpellier, puisque toutes les données actinométriques utilisées dans la suite de ce travail proviennent de mesures effectuées dans cette localité.

J'ai pris pour δ les moyennes mensuelles, à midi, de cette quantité, d'après les données fournies par la *Connaissance des Temps*.

Ces valeurs sont les suivantes :

Janvier	— 20°40'
Février	— 12,44
Mars	— 1,38
Avril	+ 9,50
Mai	+ 18, 4
Juin	+ 23, 5
Juillet	+ 21, 9
Août	+ 13,37
Septembre	+ 2,49
Octobre	— 8,48
Novembre	— 18,25
Décembre	— 23, 4

Quant aux heures du lever et du coucher du Soleil $\mp t_0$, elles ont été calculées en posant $\sin h = 0$, ce qui donne :

$$\cos t_0 = - \operatorname{tg} \lambda \operatorname{tg} \delta.$$

Ces valeurs sont consignées dans le tableau ci-après :

ANGLE HORAIRE	
Janvier	68°56'
Février	77,34
Mars	88,27
Avril	99,30
Mai	108, 6
Juin	113,58
Juillet	111,38
Août	103,21
Septembre	87,49
Octobre	81,31
Novembre	71,30
Décembre	66, 7

Les valeurs horaires mensuelles de $\sin h$ calculées à l'aide des nombres précédents et en négligeant la réfraction (ce qui n'entraîne pas de changements bien considérables dans les sommes de chaleur), sont réunies dans le tableau suivant :

Tableau des valeurs horaires mensuelles de $\sin h$.

MOIS	5 HEURES	6 HEURES	7 HEURES	8 HEURES	9 HEURES	10 HEURES	11 HEURES	12 HEURES
Janvier . .	»	»	»	0,09522	0,23551	0,34316	0,41087	0,43391
Février . .	»	»	0,03072	0,20103	0,34728	0,45951	0,53009	0,55411
Mars . . .	»	»	0,16764	0,34218	0,49206	0,60707	0,67940	0,70402
Avril . . .	»	0,11783	0,30245	0,47449	0,62223	0,73559	0,80689	0,83116
Mai	0,03580	0,21394	0,39208	0,55808	0,70063	0,81001	0,87880	0,90222
Juin	0,09808	0,27045	0,44282	0,60345	0,74138	0,84723	0,91379	0,93645
Juillet . .	0,07414	0,24890	0,42366	0,58650	0,72634	0,83364	0,90413	0,92410
Août	»	0,16241	0,34452	0,51423	0,65995	0,77177	0,84210	0,86604
Septembre .	»	»	0,22105	0,39545	0,54521	0,66013	0,73240	0,75700
Octobre . .	»	»	0,07968	0,25223	0,40041	0,51411	0,58562	0,60996
Novembre .	»	»	»	0,12551	0,26777	0,37694	0,44559	0,46896
Décembre .	»	»	»	0,06344	0,20145	0,30734	0,37394	0,39661

2° Calcul de $\frac{1}{p^2}$. — On trouve dans la *Connaissance des Temps*, la valeur, pour chaque jour, à midi moyen, du logarithme

du rayon vecteur de la distance de la Terre au Soleil (les distances étant exprimées en fonction du demi grand axe de l'orbite terrestre).

Les nombres qui figurent dans le tableau suivant sont les moyennes mensuelles de $\log r^2$.

Janvier	1,98597
Février	1,98963
Mars.	1,99594
Avril.	0,00043
Mai	0,00988
Juin	0,01368
Juillet	0,01410
Août.	0,01030
Septembre	0,00432
Octobre	1,99682
Novembre	1,99012
Décembre	1,98610

3° *Calcul de x.* — La masse d'air x traversée par les rayons solaires est une fonction de la hauteur du Soleil. Elle a été calculée par différents auteurs, Bouguer, Lambert, Laplace, Violle, Maurer.

Bouguer (1), en supposant l'atmosphère parfaitement homogène, ayant partout la même densité et la même température, est arrivé à une formule identique à la suivante :

$$x = \frac{f}{\sin h} - \frac{1}{2} f^2 \frac{\cos^2 h}{a \sin^3 h} + \frac{1}{2} f^3 \frac{\cos^3 h}{a \sin^5 h} - \frac{1}{6} f^4 \frac{\cos^4 h}{a \sin^7 h},$$

dans laquelle a représente le rayon de la Terre, f la masse d'air traversée contenue dans un cylindre vertical ayant l'unité de surface pour section, h la hauteur de l'astre au-dessus de l'horizon.

La formule de Bouguer a été mise sous une forme un peu plus simple par M. Angot (2). Si l'on prend pour unité de masse, la masse d'air comprise dans un cylindre vertical

(1) *Essai d'optique sur la gradation de la lumière.*

(2) *Annales du B. C. mét. de Fr.*, 1883, t. III, p. 130.

ayant l'unité pour section, ce qui revient à poser $f=1$ dans la formule de Bouguer, celle-ci devient :

$$x = \frac{1}{\sin h} - \frac{1}{2a} \cotg^2 h \frac{1}{\sin h} + \frac{1}{2a^2} \cotg^2 h \frac{1}{\sin^2 h} - \frac{1}{6a} \cotg^2 h \frac{1}{\sin h} \\ = \frac{1}{\sin h} \left\{ 1 - \frac{1}{2a} \cotg^2 h \left(\frac{4}{3} - \frac{1}{a \sin^2 h} \right) \right\}.$$

Lambert a proposé la relation suivante :

$$x = \sqrt{2Rh + h^2 + R^2 \cos^2 z} - R \cos z,$$

dans laquelle R est le rayon moyen de la Terre, h la hauteur de l'atmosphère, et z la distance zénithale du Soleil (1).

Laplace a donné l'expression :

$$x = \frac{\Delta z}{a_0 \sin z}$$

où a_0 est la constante de la réfraction pour $z=0$ et Δz la réfraction astronomique, c'est-à-dire l'angle qu'il faut ajouter à la distance zénithale apparente de l'astre, pour avoir sa distance zénithale vraie (2).

Enfin, M. Maurer (3) est arrivé à la formule :

$$x = \frac{a}{h} \left[\frac{\mu_0 + 1}{2} \delta z \sin z + \sqrt{\left(1 + \frac{h}{a} \right)^2 - \mu_0^2 \sin^2 z} - \cos z \right],$$

dans laquelle a représente le rapport du rayon de la Terre à la hauteur théorique de l'atmosphère supposée homogène, μ_0 l'indice de réfraction, par rapport au vide, de l'air à 0° , et sous la pression de 760 millimètres, δz la réfraction astronomique pour la distance zénithale considérée.

J'ai réuni dans le tableau ci-après les valeurs de x pour

(1) *Photométrie*. Paris, 1760.

(2) *Méc. Cél.*, t. IV, liv. X, ch. III, p. 283.

(3) *Arch. des Sc. Phys. et Nat.*, 3^e période, t. IX, p. 374.

des distances zénithales variables de 0° à 90°, calculées d'après ces diverses formules. J'ai ajouté, en regard, les valeurs que l'on obtient en posant simplement :

$$x = \frac{1}{\sin h}.$$

Les valeurs de x , suivant la formule de Bouguer, ont été calculées pour la première fois par Forbes (1). Elles ont été reproduites successivement par MM. Crova (2), Radau (3), Maurer (4), Angot (5), Violle (6).

Pouillet, puis Descroix (7), ont calculé la formule de Lambert en posant $R = 80$ et $h = 1$, ce qui suppose que l'atmosphère sensible s'étend jusqu'à une hauteur de $\frac{6.366}{80} = 80$ kilomètres. Cette formule tend à exagérer l'influence des couches supérieures de l'atmosphère et à diminuer celle des couches basses; elle ne conduit à des résultats à peu près exacts, que si on suppose l'atmosphère sensible limitée à 10 kilomètres, ce qui correspond à $R = 630$. Ce sont les nombres calculés dans cette hypothèse qui figurent au tableau.

La formule de Laplace a été calculée par M. Violle, et les résultats en ont été publiés dans l'*Annuaire de Montsouris*.

La formule de Maurer a été calculée en posant $a = 100 h$, c'est-à-dire, $h = 65.000$ mètres environ. On ne considère ainsi que l'absorption des rayons calorifiques dans une couche gazeuse de 65.000 mètres, et l'on néglige l'influence de la matière qui se trouve au delà.

(1) *Phil. trans. of the Roy Soc. for the year, 1842, part. I, p. 225.*

(2) *Acad. des Sc. et Lett. de Montpellier, 1876. — Annales de Ch. et Phys., t. XI, 1877, p. 433.*

(3) *Actinométrie, 1877.*

(4) *Arch. des Sc. Phys. et Nat., p. 390.*

(5) *Annales du B. C. mét. de Fr., 1883, t. III, p. 131.*

(6) *Annales de Ch. et Phys., 1879, t. XVII, p. 41.*

(7) *Annuaire de Montsouris, 1881, p. 31.*

On a adopté pour μ_0 le nombre 1,000.294 trouvé par Biot, Arago et Jamin :

DISTANCE zénithale	$\frac{1}{\sin h}$	LAPLACE VIOLE	LAMBERT	BOUGUER	MAURER
0° . . .	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
10 . . .	1,015	1,016	1,015	1,015	1,016
20 . . .	1,064	1,065	1,064	1,064	1,064
30 . . .	1,155	1,155	1,153	1,155	1,152
40 . . .	1,305	1,305	1,303	1,305	1,301
50 . . .	1,556	1,555	1,553	1,556	1,545
60 . . .	2,000	1,995	1,995	1,990	1,973
70 . . .	2,924	2,902	2,906	2,900	2,826
75 . . .	3,864	3,809	3,822	3,805	3,637
80 . . .	5,760	5,700	5,620	5,560	5,080
85 . . .	11,470	10,220	10,480	10,200	8,037
86 . . .	14,300	12,200	12,600	12,140	8,977
87 . . .	19,100	14,900	15,500	14,877	10,096
88 . . .	28,700	18,900	19,900	19,031	11,432
89 . . .	57,300	25,100	26,200	25,807	13,029
90 . . .	∞	35,500	35,500	34,496	14,961

L'examen de ce tableau nous montre que, pour les distances zénithales inférieures à 75°-80° les valeurs de x calculées d'après les diverses formules sont sensiblement les mêmes, mais que, dès que cette distance dépasse 75°-80°, les différences peuvent devenir considérables.

Dans la représentation graphique des quantités de chaleur qui parviennent au sol, aux différentes heures de la journée, les abscisses étant les temps, les ordonnées sont proportionnelles aux valeurs de $(1+x)^{-p} \sin h$. Ce qu'il nous importe de considérer pour la suite des calculs, ce sont donc les valeurs de cette expression pour les différentes valeurs de p et de h .

A cet effet, j'ai calculé ces valeurs en posant successivement $p=1$ et $p=2$ qui sont, comme nous le verrons plus loin, les valeurs extrêmes que peut prendre ce facteur, et pour des valeurs de x obtenues en partant des différentes formules et correspondant aux valeurs de h comprises entre 0° et 20°.

J'ai formé ainsi le tableau suivant :

Valeurs de l'expression $(1 + x)^{-p} \sin h$.

1° $p = 1$.					
h	$\frac{1}{\sin h}$	LAPLACE	LAMBERT	BOUGUER	MAURER
20° . . .	0,087	0,087	0,088	0,088	0,089
15 . . .	0,053	0,054	0,054	0,054	0,056
10 . . .	0,026	0,026	0,026	0,026	0,029
5 . . .	0,007	0,008	0,008	0,008	0,009
0 . . .	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

2° $p = 2$.					
20° . . .	0,022	0,022	0,022	0,022	0,023
15 . . .	0,011	0,011	0,011	0,011	0,012
10 . . .	0,004	0,004	0,004	0,004	0,005
5 . . .	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001
0 . . .	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Les nombres ci-dessus ne diffèrent entre eux que de quantités extrêmement faibles. Quelle que soit la formule adoptée pour calculer x , les courbes figuratives des quantités de chaleur tombant sur le sol aux divers instants du jour auront donc pratiquement les mêmes ordonnées, les quantités de chaleur correspondantes reçues en un jour seront sensiblement les mêmes et, par conséquent, on peut prendre pour x , l'une quelconque des expressions proposées.

J'ai adopté la formule simple :

$$x = \frac{1}{\sin h}.$$

Le tableau de la page suivante contient les valeurs de x calculées d'après cette formule, pour Montpellier.

Tableau des valeurs horaires mensuelles de $x = \frac{1}{\sin h}$.

MOIS	5 HEURES	6 HEURES	7 HEURES	8 HEURES	9 HEURES	10 HEURES	11 HEURES	12 HEURES
Janvier	"	"	"	10,50	4,25	2,91	2,44	2,30
Février	"	"	32,55	4,97	2,88	2,48	1,89	1,80
Mars	"	"	3,96	2,92	2,03	1,65	1,47	1,42
Avril	"	8,48	3,31	2,11	1,61	1,36	1,24	1,20
Mai	27,93	4,67	2,55	1,79	1,43	1,23	1,14	1,11
Juin	10,20	3,70	2,26	1,66	1,35	1,18	1,09	1,07
Juillet	13,49	4,02	2,36	1,71	1,38	1,20	1,11	1,08
Août	"	6,16	2,90	1,94	1,52	1,30	1,19	1,15
Septembre	"	"	4,52	2,53	1,83	1,51	1,37	1,32
Octobre	"	"	12,55	3,96	2,50	1,95	1,71	1,64
Novembre	"	"	"	7,97	3,73	2,65	2,24	2,13
Décembre	"	"	"	15,76	4,96	3,25	2,67	2,52

4° *Valeur de C.* — La constante C a une signification bien marquée par la forme même de l'équation (1). Si l'on y fait $x=0$, il reste $y=C$; et, par conséquent, C exprime l'intensité calorifique de la radiation solaire à la limite de l'atmosphère.

Pouillet a désigné cette quantité sous le nom de *constante solaire*.

Quelle est sa valeur?

Disons tout de suite que si l'on connaît un grand nombre de formules permettant de suivre la marche de la radiation pendant une même journée ou reliant d'une façon satisfaisante les diverses observations suivant une même verticale, on ne possède encore aucune formule d'où l'on puisse déduire, avec quelque certitude, la constante solaire.

Celle-ci, ne peut, en effet, être obtenue que par extrapolation.

Or, en admettant que le rayonnement du Soleil arrive *intact* aux limites de notre atmosphère, qu'il n'éprouve pas, dans les régions de l'espace qui nous séparent de cet astre,

des actions spéciales de la part des essaims ainsi que de la matière cosmique qu'il peut rencontrer, ne doit-on pas craindre que le caractère de l'absorption atmosphérique ne reste pas le même à toutes les altitudes, que certaines radiations se trouvent entièrement absorbées dans leur trajet à travers les couches supérieures de l'atmosphère terrestre, ou encore par le système d'appareils servant à mesurer leur énergie, et, que, par suite, elles échappent à l'investigation? Ne doit-on pas craindre aussi que, par une diffusion due tant aux particules de toutes sortes, solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère, qu'aux particules mêmes de l'air, une portion notable et inconnue de ce rayonnement ne soit déviée de sa direction ou même rejetée hors de notre atmosphère?

Le problème de la détermination de la *constante solaire* est donc, comme on le voit, d'une extrême complexité. Il est loin d'être définitivement résolu.

Parmi les résultats trouvés par les nombreux physiciens qui se sont occupés de cette question, je citerai les suivants :

Pouillet a obtenu à Paris des nombres variant de 4,5 calories à 4,76 calories; M. Violle, au sommet du mont Blanc, a atteint 2,54 calories; M. Langley, sur le mont Whitney, a été conduit à 3 calories; M. Savélieff, à Kieff, a obtenu 3,5 calories; M. Crova, sur le mont Ventoux, a trouvé 2,9 calories; M. Angström, dans l'île d'Yxelö, est arrivé à 4 calories. C'est ce dernier chiffre que j'ai utilisé dans la suite des calculs.

Les unités adoptées pour cette mesure sont : le centimètre carré, la minute et la petite calorie.

Je ferai remarquer à ce propos que la constante solaire est l'objet d'une exception singulière : elle n'est pas C. G. S. Le rayonnement d'une lampe électrique mesuré par les watts aux bornes, s'exprime en calories par *seconde*. Pourquoi le rayonnement solaire fait-il exception?

5° *Calcul de p.* — Pour déterminer p , j'ai procédé de la façon suivante :

La relation :

$$q = \frac{C}{r^2} (1+x)^{-p} \sin h$$

devient, si l'on pose $\sin h = 1$ ou $h = 90^\circ$, ce qui correspond au cas de l'incidence normale :

$$q = \frac{C}{r^2} (1+x)^{-p}.$$

En prenant les logarithmes, on a :

$$\log q = \log C - p \log (1+x) - \log r^2,$$

d'où :

$$p = \frac{\log C - \log q - \log r^2}{\log (1+x)}.$$

En remplaçant dans le second membre de cette relation les lettres par leurs valeurs numériques, on obtient pour chaque mois les valeurs moyennes de p .

Les valeurs numériques de $\log C$, $\log r^2$ et $\log (1+x)$ se déduisent aisément des nombres consignés dans les tableaux précédents; celles de $\log q$ s'obtiennent directement, en partant des valeurs fournies par les mesures actinométriques effectuées à la station de l'École d'agriculture de Montpellier.

Ces observations ont été faites, les jours où le Soleil brillait, au moyen d'un actinomètre Crova. Les nombres inscrits dans le tableau ci-contre représentent pour chaque mois l'intensité calorifique moyenne q de la radiation solaire à midi, c'est-à-dire la quantité de chaleur absorbée par 1 centimètre carré de la surface noircie de l'actinomètre, pendant une minute, sous l'incidence normale.

L'unité adoptée est la petite calorie (gramme-degré), c'est-à-dire la quantité de chaleur nécessaire pour élever de un degré centigrade la température de un gramme d'eau.

Valeurs moyennes mensuelles de l'intensité calorifique q de la radiation solaire mesurée à midi.

ANNÉES	JANVIER	FÉVRIER	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUILLET	AOUT	SEPTEMBRE	OCTOBRE	NOVEMBRE	DÉCEMBRE
1883	cal. 1,07	cal. 1,11	cal. 1,15	cal. 1,29	cal. 1,21	cal. 1,02	c.l. 1,14	cal. 1,18	cal. 1,19	cal. 1,19	cal. 1,21	cal. 0,91
1884	0,97	0,93	1,04	1,20	1,13	1,15	1,11	0,99	1,05	0,96	0,87	0,83
1885	0,85	1,11	1,04	0,96	1,03	1,09	1,10	0,85	0,85	0,86	0,97	1,00
1886	1,05	0,98	1,06	1,13	1,15	1,06	1,07	1,00	0,93	0,92	1,15	1,10
1887	1,27	1,31	1,17	1,23	1,35	1,07	1,04	1,01	1,17	1,11	1,11	1,09
1888	1,12	1,15	1,15	1,30	1,16	1,15	1,06	1,10	1,10	1,05	1,03	0,95
1889	1,01	0,98	1,20	1,21	1,12	»	1,04	1,15	»	»	1,08	1,05
1890	1,06	1,05	1,11	1,06	1,07	1,14	1,16	1,12	1,14	1,05	1,00	0,82
1891	0,94	0,95	0,93	1,10	1,09	1,09	1,19	1,13	1,06	1,07	0,94	1,03
1892	1,01	1,10	1,07	1,04	1,03	1,11	1,16	»	1,14	1,04	1,05	1,02
1893	1,01	1,07	1,16	1,15	1,27	1,22	1,16	1,18	1,50	1,17	1,16	1,05
1894	1,07	1,13	1,16	1,19	1,03	1,14	1,19	1,19	1,07	1,12	1,08	1,02
1895	1,12	1,15	1,20	1,13	1,13	1,22	1,14	1,19	1,30	1,20	1,02	1,03
1896	0,96	1,09	1,12	1,15	1,16	1,17	1,15	1,18	1,17	1,09	1,01	1,06
1897	1,13	1,06	1,16	1,16	1,24	1,18	1,14	1,22	1,21	1,23	0,98	1,02
1898	1,10	1,18	1,17	1,18	1,14	1,18	1,16	1,21	1,25	1,14	1,13	1,02
1899	1,12	1,12	1,13	1,31	1,12	1,18	1,19	1,03	1,12	1,03	1,08	1,12
1900	1,06	1,09	1,18	1,12	1,11	1,11	1,12	1,34	1,14	1,22	1,11	»

Valeurs moyennes mensuelles du facteur *p* pour la période 1883-1901.

ANNÉES	JANVIER	FÉVRIER	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUILLET	AOUT	SEPTEMBRE	OCTOBRE	NOVEMBRE	DÉCEMBRE
1883.	1,13	1,27	1,42	1,43	1,57	1,83	1,67	1,56	1,43	1,26	1,07	1,20
1884.	1,21	1,44	1,53	1,52	1,66	1,67	1,71	1,79	1,58	1,48	1,36	1,27
1885.	1,32	1,27	1,53	1,80	1,79	1,74	1,72	1,99	1,83	1,59	1,26	1,13
1886.	1,15	1,39	1,51	1,59	1,64	1,78	1,76	1,78	1,72	1,52	1,11	1,05
1887.	0,99	1,10	1,40	1,49	1,42	1,77	1,79	1,77	1,45	1,33	1,14	1,06
1888.	1,09	1,23	1,42	1,40	1,63	1,67	1,77	1,66	1,52	1,39	1,21	1,17
1889.	1,18	1,39	1,37	1,51	1,67	»	1,79	1,59	»	»	1,17	1,09
1890.	1,13	1,32	1,46	1,67	1,74	1,68	1,65	1,63	1,48	1,39	1,24	1,28
1891.	1,24	1,42	1,66	1,63	1,71	1,74	1,61	1,62	1,57	1,37	1,29	1,10
1892.	1,18	1,28	1,50	1,69	1,79	1,68	1,65	»	1,48	1,39	1,19	1,11
1893.	1,18	1,30	1,44	1,57	1,51	1,59	1,65	1,56	1,42	1,27	1,10	1,09
1894.	1,13	1,25	1,41	1,53	1,79	1,68	1,61	1,55	1,56	1,32	1,17	1,11
1895.	1,09	1,23	1,37	1,59	1,66	1,59	1,67	1,55	1,32	1,25	1,22	1,10
1896.	1,22	1,29	1,45	1,57	1,63	1,63	1,66	1,56	1,45	1,35	1,23	1,08
1897.	1,09	1,31	1,41	1,56	1,54	1,63	1,67	1,52	1,41	1,23	1,25	1,11
1898.	1,11	1,21	1,40	1,54	1,65	1,63	1,65	1,53	1,37	1,30	1,13	1,11
1899.	1,09	1,26	1,44	1,44	1,67	1,63	1,61	1,74	1,51	1,44	1,17	1,04
1900.	1,13	1,29	1,39	1,60	1,69	1,72	1,69	1,40	1,48	1,23	1,14	»

Les données numériques précédentes m'ont permis de calculer pour chaque heure de la journée moyenne fictive des différents mois de la période 1883-1901, les valeurs correspondantes de la relation

$$\frac{C}{p^2}(1+x)^{-p} \sin h.$$

Les surfaces des courbes ayant pour ordonnées ces valeurs, et pour abscisses les temps, depuis le moment du lever du Soleil jusqu'à celui de son coucher, représentent des quantités proportionnelles aux quantités de chaleur qui parviennent au sol pendant la durée de la journée moyenne correspondante. J'ai ainsi obtenu 216 courbes dont j'ai d'abord évalué les aires à l'aide du planimètre. Puis, j'ai représenté graphiquement les résultats, en prenant pour ordonnées les valeurs de p et pour abscisses les aires fournies par le planimètre. Enfin, j'ai fait passer une courbe entre ces différents points en m'efforçant de m'en écarter le moins possible, tout en conservant cependant à la courbe une forme régulière sans variation brusque du rayon de courbure.

Les douze courbes ainsi construites m'ont permis de trouver les valeurs les plus probables des aires en question.

Pour transformer ces nombres en calories, il ne reste plus qu'à déterminer la valeur numérique du facteur de réduction. Dans le tracé graphique des diverses courbes, chaque heure a été représentée par 0^m,010 d'abscisse, et chaque calorie par 0^m,050 d'ordonnée. Par suite, une surface de 0^m,010 $\times$ 0^m,050 = 500 millimètres carrés, équivaut à :

$$1 \text{ cal. } \times 60 = 60 \text{ cal.,}$$

et, par conséquent, 1 millimètre carré correspond à :

$$\frac{60}{500} = 0 \text{ cal. } 12.$$

En multipliant alors par 0,12 les surfaces évaluées précédemment, on obtient les valeurs numériques qui représentent la quantité de chaleur reçue pendant chaque jour moyen mensuel de la période 1883-1901.

Comparaison des quantités de chaleur reçues à la surface du sol avec les taches, les facules et les protubérances solaires de 1883 à 1901.

En 1894, M. Savélieff publia, dans les *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, la note suivante sur l'influence qu'exercent les taches solaires sur la quantité de chaleur reçue par le sol :

« La période que nous venons de traverser, écrivait-il, a été remarquable par l'abondance des taches solaires; on sait que leur périodicité concorde sensiblement avec celle des perturbations magnétiques et des manifestations électriques telles que les aurores boréales et les courants telluriques, c'est-à-dire des orages magnétiques; en est-il de même de l'intensité calorifique de la radiation solaire et celle-ci est-elle affectée d'une périodicité analogue?

Je me suis proposé de jeter quelque lumière sur cette question en discutant les nombreuses observations que j'ai faites d'une manière continue à Kieff, depuis le mois de juin 1890 jusqu'à ce jour, au moyen de l'actinographe de M. Crova et en les comparant avec celles que M. Wolff a faites à l'Observatoire de Zurich sur la fréquence des taches solaires (1).

J'ai eu d'abord recours aux déterminations de la constante solaire; malheureusement, dans le cours du dernier hiver, je n'ai obtenu aucune courbe absolument symétrique, aussi ai-je limité mes comparaisons aux résultats obtenus

(1) *Meteorologische Zeitschrift*.

dans trois journées seulement, dont j'ai publié les observations (1).

DATES	CONSTANTE solaire	NOMBRE de taches solaires
28 décembre 1890	3,47	0
10 novembre 1891	3,54	40
25 février 1892	3,54	35

La constante solaire ne pouvant être calculée que par extrapolation, sa valeur est, dans une certaine mesure, sujette à discussion; aussi, serait-il prématuré d'affirmer que la constante solaire augmente avec l'accroissement de l'activité de la surface solaire caractérisée par la fréquence des taches observées à sa surface.

D'autre part, j'ai calculé, pour l'été (juin-juillet-août) et pour l'automne (septembre-octobre-novembre), la quantité moyenne de chaleur reçue sur 1 centimètre carré de surface horizontale du sol en un jour et pendant une heure de radiation solaire; j'ai ainsi obtenu le tableau suivant :

	QUANTITÉ MOYENNE de chaleur solaire reçue		QUANTITÉ de taches solaires
	en un jour	en une heure	
Été 1890	280 cal.	29,8 cal.	6,8
— 1891	322	34,2	46,8
— 1892	317	36,0	85,7
Automne 1890	59	22,0	11,7
— 1891	154	25,2	47,8
— 1892	103	21,2	68,0

Quoique la chaleur reçue à la surface du sol dépende, non seulement de l'intensité calorifique de la radiation solaire aux limites de l'atmosphère, c'est-à-dire de la constante solaire, mais aussi du coefficient de transparence calorifique de l'atmosphère, il est à remarquer que cette dernière cause de variation est bien atténuée, puisque chacun

(1) C. R., 25 mai 1891. — *Annales de Ch. et Phys.*, avril 1892 et 1893.

des nombres de la table ci-dessus est la moyenne de quatre-vingt-dix journées.

Aussi, me paraît-il que la concordance des résultats obtenus par cette seconde méthode et de ceux que j'ai déduits de la constante solaire, permet d'admettre avec une grande probabilité que l'intensité calorifique de la radiation solaire augmente avec l'activité des phénomènes qui se produisent à la surface du Soleil, celle-ci étant caractérisée par l'accroissement du nombre des taches.

Une seule anomalie se manifeste dans l'automne de 1892; encore s'expliquerait-elle si l'on admettait que l'intensité de la radiation augmente moins avec le nombre absolu des taches qu'avec la rapidité de leur évolution ou même est immédiatement consécutive à leur diminution (1). »

Telles sont les conclusions de M. Savélief.

Malheureusement, ses observations portent sur un nombre trop restreint d'années pour que l'on puisse admettre, avec quelque certitude, l'existence d'une connexion entre les variations de l'activité solaire et de la chaleur reçue par la Terre.

Nous ferons un pas de plus dans l'élucidation de ce problème en faisant porter la comparaison sur une période de temps plus longue, telle que celle comprise entre 1883-1901.

Les quantités de chaleur qui auraient été versées en moyenne, pendant un jour, chaque mois, de 1883 à 1901, calculées comme il a été indiqué précédemment, sont consignées dans le tableau suivant. Les valeurs annuelles ont été déduites de la moyenne arithmétique des douze moyennes mensuelles correspondantes.

Il convient de bien remarquer que tous ces nombres ont été obtenus en supposant implicitement un ciel constamment serein, sans nébulosité apparente.

(1) *C. R.*, t. CXVIII, p. 62.

Quantités moyennes de chaleur qui seraient parvenues au sol par un ciel supposé sans nuages apparents, pendant un jour moyen de chacun des mois de la période 1883-1901.

ANNÉES	JANVIER	FÉVRIER	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUILLET	AOUT	SEPTEMBRE	OCTOBRE	NOVEMBRE	DÉCEMBRE	ANNÉE (moyenne des années mensuelles)
1883	cal. 127	cal. 189	cal. 281	cal. 416	cal. 453	cal. 402	cal. 442	cal. 404	cal. 325	cal. 237	cal. 164	cal. 93	cal. 295
1884	114	135	250	383	417	456	425	330	280	183	114	85	266
1885	98	189	250	293	369	430	420	274	217	165	129	103	245
1886	124	164	255	357	426	417	403	333	243	176	156	116	264
1887	157	230	288	393	515	421	391	336	318	217	149	114	294
1888	135	198	281	428	430	436	399	369	297	202	137	97	286
1889	114	164	297	387	414	»	391	393	»	»	144	109	268
1890	127	178	269	331	386	433	449	379	309	202	132	84	275
1891	109	159	220	344	398	430	467	383	283	207	124	108	269
1892	111	187	258	325	369	453	449	»	309	202	140	106	265
1893	114	182	284	464	476	492	449	404	328	234	157	109	300
1894	127	193	284	379	369	433	467	408	286	220	144	106	286
1895	135	198	297	357	417	492	442	408	364	241	135	108	300
1896	112	184	272	364	430	465	445	404	318	211	133	111	288
1897	135	180	284	368	465	473	442	420	334	247	130	106	298
1898	131	202	288	374	422	473	449	416	345	225	131	106	300
1899	135	191	273	425	414	473	467	345	300	197	144	118	290
1900	127	184	290	354	406	437	434	471	309	247	149	»	310

Le tableau ci-après renferme les données relatives à l'activité solaire rapportée aux taches, aux facules et aux protubérances. Les nombres correspondant aux taches et aux facules représentent la surface solaire tachée exprimée en millionnièmes de l'hémisphère visible (1). Ceux donnés pour les protubérances indiquent leur fréquence relative. Ce sont les moyennes des valeurs trouvées d'une part par Tacchini, d'autre part par Ricco et Mascari. Ces valeurs m'ont été très obligeamment communiquées par M. W. Lockyer.

	TACHES	FACULES	PROTUBÉRANCES
1882	1.326	2.014	2.986
1883	1.595	1.598	3.352
1884	1.478	1.731	4.028
1885	1.122	1.241	3.608
1886	381	579	2.660
1887	179	301	2.660
1888	89	239	2.124
1889	78	131	1.130
1890	99	304	1.138
1891	569	1.412	2.624
1892	1.214	3.270	3.089
1893	1.464	2.404	2.613
1894	1.282	1.877	2.144
1895	974	2.278	1.986
1896	543	1.410	1.851
1897	514	1.149	1.817
1898	375	891	1.333
1899	111	337	978
1900	75	180	913
1901	29	29	314

Si l'on construit alors la courbe des quantités de chaleur reçues chaque année durant une journée moyenne et si on la compare soit à celle des taches, soit à celle des facules ou des protubérances, aucune correspondance bien nette n'apparaît entre elles.

Pour faire ressortir cette correspondance, si elle existe, il est nécessaire d'atténuer les perturbations accidentelles

(1) Greenwich : *Spectroscopic and photographic results.*

en adoucissant un peu les courbes, en prenant la moyenne de plusieurs années, de manière à former une sorte d'année moyenne fictive pour chaque année successive. Par exemple, la moyenne de 1890, pourra être calculée d'après les moyennes des trois années 1889, 1890, 1891.

Cette manière de procéder a été fréquemment employée pour d'autres éléments météorologiques. Sans doute, il ne faut pas abuser des moyennes, mais nous devons nous en servir pour dégager les lois fondamentales. Il en est un peu des variations des éléments météorologiques comme du mouvement des planètes. Si l'on s'était douté de toutes les perturbations que présente leur orbite, les lois de Kepler seraient demeurées inaperçues.

Les irrégularités seront évidemment d'autant plus atténuées qu'on associera un plus grand nombre d'années. Les moyennes de trois années suffisent pour tempérer les grandes divergences.

En procédant ainsi, on obtient les tableaux suivants :

	CALORIES	TACHES	FACULES	PROTUBÉRANCES
1882-1883-1884. . .	280	1.466	1.781	3.455
1883-1884-1885. . .	268	1.378	1.523	3.663
1884-1885-1886. . .	258	994	1.184	3.432
1885-1886-1887. . .	268	561	707	2.976
1886-1887-1888. . .	281	216	373	2.481
1887-1888-1889. . .	283	115	224	1.971
1888-1889-1890. . .	276	89	225	1.464
1889-1890-1891. . .	271	249	616	1.631
1890-1891-1892. . .	270	628	1.662	2.284
1891-1892-1893. . .	278	1.082	2.362	2.775
1892-1893-1894. . .	284	1.320	2.517	2.615
1893-1894-1895. . .	295	1.240	2.186	2.248
1894-1895-1896. . .	291	933	1.855	1.994
1895-1896-1897. . .	295	677	1.612	1.885
1896-1897-1898. . .	295	477	1.150	1.667
1897-1898-1899. . .	296	333	792	1.376
1898-1899-1900. . .	300	187	469	1.075
1899-1900-1901. . .	300	72	182	735

En jetant un coup d'œil d'ensemble sur les courbes figu-

ratives (fig. 4) des nombres de ce tableau, il est difficile de

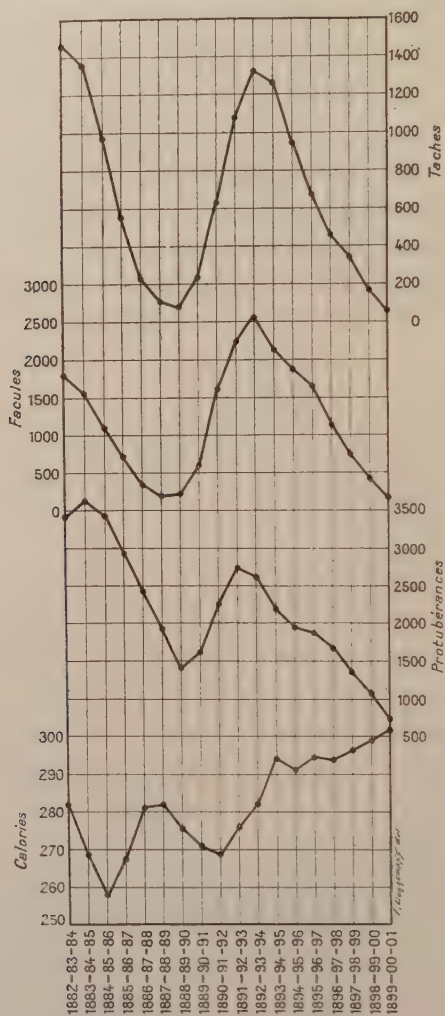


FIG. 4. — Relation entre les phénomènes solaires et la chaleur qui parvient au sol.

se défendre d'une impression de corrélation. Il convient, d'ailleurs, de remarquer que les variations de l'activité

solaire sont *certainement plus complexes* que ne l'indiquerait une interprétation trop étroite des taches, des facules et des protubérances.

Ces phénomènes solaires ne semblent pas, non plus, être de même importance. Certains groupes de facules, par exemple, peuvent persister à la surface du Soleil pendant un temps considérable et l'on y voit se former des taches qui disparaissent au bout de quelque temps et, souvent même, sont remplacées un peu plus tard par d'autres, sans que le groupe de facules ait cessé d'exister.

D'une façon générale, on voit que, à Montpellier, les quantités de chaleur qui parviendraient à la surface du sol si le ciel était constamment serein, éprouvent une *variation inverse* de celle qui régit les phénomènes des taches, des facules et des protubérances : *aux maxima et aux minima de l'activité solaire correspondent respectivement les minima et les maxima des calories reçues.*

L'examen de ces courbes conduit encore à une autre remarque :

Alors que les courbes des taches des facules et surtout des protubérances accusent une allure nettement descendante, la courbe des calories présente au contraire une marche ascendante. Ce résultat n'est qu'une conséquence logique du précédent. Si, en effet, les maxima de la courbe des calories correspondent aux minima des autres courbes et inversement, n'est-il pas naturel que si celles-ci présentent une tendance à s'incliner vers le bas, la première se relève, au contraire, vers le haut, autrement dit, que les deux groupes de courbes soient en quelque sorte symétriques?

Est-ce à dire que, contrairement à ce que les observations spectroscopiques permettent de supposer, savoir qu'aux époques de maximum de taches, l'énergie solaire présente, au point de vue calorifique, un surcroît d'activité, la chaleur qui nous parvient éprouve une fluctuation inverse, augmentant aux époques de minima et diminuant aux époques de maxima?

Assurément non ; car, en dehors des pertes encore inconnues que subit la radiation solaire dans les régions supérieures de l'atmosphère, l'évaporation qui se produit à la surface du sol et surtout des océans, intervient sans cesse pour modifier l'énergie solaire dans son trajet à travers notre atmosphère. La plus grande partie de la surface du globe étant recouverte d'eau, si, pendant une certaine période de temps, la chaleur que nous envoie le Soleil éprouve, par exemple, une augmentation, l'effet immédiat sera que l'évaporation à la surface du globe deviendra plus active. La vapeur d'eau qui s'élèvera ainsi dans l'atmosphère d'une manière continue, exercera sur les radiations calorifiques une absorption élective plus considérable et par conséquent en diminuera graduellement l'intensité. Nous aurons ainsi, en même temps, deux causes en œuvre, agissant en sens inverse l'une de l'autre. Dans ces conditions, on conçoit qu'il puisse arriver que leurs effets se compensent et même au delà, de sorte que les mesures actinométriques, au lieu d'accuser un accroissement dans la quantité de chaleur reçue à la surface du sol, indiquent, au contraire, une diminution.

De même, admettons que, pendant une certaine période, l'énergie solaire subisse un ralentissement. L'évaporation fournira des quantités moindres de vapeur d'eau ; l'absorption conséquente ira en diminuant, et il pourra en résulter que l'affaiblissement de la radiation transmise devienne non seulement de moins en moins considérable, mais encore s'arrête et même change de signe, déterminant ainsi un accroissement dans la chaleur reçue et mesurée à la surface du sol, alors que l'énergie qui nous parviendrait si l'atmosphère était parfaitement transparente éprouverait, au contraire, une diminution.

Si l'on admet cette explication, ne peut-on, dès lors, se croire autorisé à penser que si la radiation solaire nous arrivait intacte elle présenterait une variation analogue à celle des taches et des protubérances ?

II

VARIATION ANNUELLE DE LA QUANTITÉ DE CHALEUR PARVENANT AU SOL

Nous allons étudier maintenant la variation annuelle de la quantité de chaleur reçue à la surface du sol :

1° Dans l'hypothèse d'une atmosphère parfaitement transparente ;

2° Dans le cas de l'atmosphère exerçant son action, mais en supposant que le ciel reste constamment serein et sans aucune nébulosité apparente ;

3° Dans les conditions ordinaires.

I. — En supposant que la chaleur que nous envoie le Soleil ne subisse aucun affaiblissement par son passage à travers l'atmosphère terrestre, la quantité de chaleur dq reçue pendant un temps dt sur une surface horizontale égale à l'unité aura pour expression :

$$dq = \frac{K}{r^2} \sin h \, dt.$$

La quantité Q tombant dans le cours d'une journée s'obtiendra en intégrant l'équation ci-dessous entre les limites $-t_0$ et $+t_0$ correspondant aux heures du lever et du coucher du Soleil. On a donc :

$$Q = \frac{K}{r^2} \int_{-t_0}^{+t_0} (\sin \lambda \sin \delta + \cos \lambda \cos \delta \cos t) dt$$

$$= \frac{2K}{r^2} (\sin \lambda \sin \delta \cdot t_0 + \cos \lambda \cos \delta \sin t_0). \quad (1)$$

Au moyen des valeurs moyennes mensuelles de ρ , δ et t_0 , calculées plus haut, il devient facile de déterminer pour chaque mois la valeur numérique moyenne de l'expression :

$$\frac{1}{r^2} (\sin \lambda \sin \delta \cdot t_0 + \cos \lambda \cos \delta \sin t_0).$$

On trouve ainsi :

Janvier.	0,350
Février.	0,495
Mars.	0,699
Avril.	0,905
Mai	1,032
Juin	1,110
Juillet	1,075
Août.	0,953
Septembre	0,764
Octobre.	0,562
Novembre	0,389
Décembre	0,308

D'autre part, si, dans la relation (1) on pose $\delta = 0$, $\lambda = 0$, $t_0 = \frac{\pi}{2}$, $r = 1$, il reste :

$$Q = 2K.$$

C'est l'expression de la chaleur reçue à l'équateur le jour de l'équinoxe, le Soleil étant supposé à sa moyenne distance de la Terre. Or, la quantité de chaleur dq reçue à l'équateur sur 1 centimètre carré de surface pendant le temps dt , à

l'heure t , le jour de l'équinoxe, est, en désignant par C la constante solaire :

$$dq = C \cos t \, dt.$$

La quantité de chaleur reçue pendant toute la journée qui comprend 720 minutes s'obtiendra en intégrant l'expression précédente. On a :

$$Q = \frac{2 \times 720 \times C}{\pi} = 458,37 \, C.$$

Posant $C = 4$ calories, il vient :

$$Q = 458,37 \times 4 = 1.833,48 \, \text{cal.}$$

Les produits de chacun des nombres du tableau ci-dessus par ce facteur 1.833,48 représenteront, exprimées en calories, les quantités moyennes de chaleur reçues chaque mois pendant la durée d'un jour à la limite supérieure de l'atmosphère, ou, ce qui revient au même, celles qui parviendraient à la surface du sol si la transparence atmosphérique était parfaite.

Ces quantités sont les suivantes :

Janvier.	642 cal.
Février.	908
Mars.	1.283
Avril.	1.663
Mai	1.896
Juin	2.037
Juillet	1.975
Août.	1.750
Septembre.	1.405
Octobre	1.030
Novembre	711
Décembre	564

La représentation graphique de la variation annuelle de la quantité de chaleur qui parvient à la surface du sol n'offrirait aucune difficulté si l'on connaissait, au lieu des

douze moyennes mensuelles, ses valeurs à différentes époques dans le cours de l'année.

Deux méthodes permettent de déduire celles-ci des premières (1).

Soit $y=f(x)$ l'équation qui exprime en fonction du temps la variation annuelle de la quantité de chaleur reçue en un jour à la surface du sol.

Si l'on désigne par $M_{1,2}$ la valeur moyenne de y pendant l'intervalle de temps compris entre les époques x_1 et x_2 , on a :

$$M_{1,2} = \frac{1}{x_2 - x_1} \int_{x_1}^{x_2} y dx. \quad (2)$$

Or, il est évident, *a priori*, que la fonction y reste finie, que, dans le cours d'une année, elle ne peut présenter qu'un seul maximum et un seul minimum.

On sait, par le théorème de Fourier, qu'une fonction offrant ces caractères peut être développée en une série de la forme :

$$y = m + a_1 \sin x + b_1 \cos x + a_2 \sin 2x + \dots,$$

dans laquelle x représente le temps compté en angles depuis le 1^{er} janvier à minuit, à raison de 360° pour l'année entière, $m, a_1, b_1, a_2 \dots$ des coefficients.

En intégrant l'équation (2) on a alors :

$$\begin{aligned} M_{1,2} = & m + \frac{1}{x_2 - x_1} [b_1(\sin x_2 - \sin x_1) - a_1(\cos x_2 - \cos x_1)] \\ & + \frac{1}{2(x_2 - x_1)} [b_2(\sin 2x_2 - \sin 2x_1) - a_2(\cos 2x_2 - \cos 2x_1)] \\ & + \frac{1}{3(x_2 - x_1)} [b_3(\sin 3x_2 - \sin 3x_1) - a_3(\cos 3x_2 - \cos 3x_1)] \\ & + \dots \end{aligned}$$

A chaque mois correspondra une équation analogue. On aura ainsi un ensemble d'équations du premier degré qui

(1) *Annales du Bureau Cent. mét. de France*, 1887, t. III.

permettront de calculer les paramètres par les méthodes connues, la méthode des moindres carrés par exemple, et, par suite, de déterminer la valeur de y à une époque quelconque.

Les calculs sont extrêmement longs et pénibles. On arrive plus rapidement au résultat de la façon suivante. Supposons que, dans un intervalle de trois mois, la loi probable de la variation soit représentée, en fonction du temps, par une expression parabolique de la forme :

$$y = a + bx + cx^2,$$

dans laquelle x représente encore le temps compté en angles à raison de 360° pour l'année, a , b , c , trois paramètres. Cette hypothèse ne cesserait d'être exacte que si, dans l'intervalle de trois mois, la fonction y présentait plusieurs maxima ou minima, ce qui n'a évidemment pas lieu.

Désignons alors par M_{n-1} , M_n et M_{n+1} les valeurs moyennes mensuelles de la quantité de chaleur envoyée, pour trois mois consécutifs; par x_{n-1} , x_n , x_{n+1} les valeurs angulaires de x correspondant au commencement de chacun de ces mois et par x_{n+2} celle qui correspond à la fin du troisième mois.

Nous devons évidemment avoir :

$$M_{n-1} = \frac{1}{x_n - x_{n-1}} \int_{x_{n-1}}^{x_n} y dx,$$

$$M_n = \frac{1}{x_{n+1} - x_n} \int_{x_n}^{x_{n+1}} y dx,$$

$$M_{n+1} = \frac{1}{x_{n+2} - x_{n+1}} \int_{x_{n+1}}^{x_{n+2}} y dx,$$

ou, en effectuant l'intégration :

$$M_{n-1} = a + b \frac{x_n + x_{n-1}}{2} + c \frac{x_n^2 + x_n x_{n-1} + x_{n-1}^2}{3},$$

$$M_n = a + b \frac{x_{n+1} + x_n}{2} + c \frac{x_{n+1}^2 + x_n^2}{3},$$

$$M_{n+1} = a + b \frac{x_{n+2} + x_{n+1}}{2} + c \frac{x_{n+2}^2 + x_{n+1}^2}{3}.$$

Soit alors y_n la valeur vraie de la quantité de chaleur reçue à une époque X_n située dans le mois intermédiaire. La correction Δ_n qu'il conviendra de faire subir à la moyenne M_n de ce mois pour obtenir y_n sera :

$$\Delta_n = y_n - M_n = b \left(X_n - \frac{x_n + x_{n+1}}{2} \right) + c \left(X_n^2 - \frac{x_n^2 + x_n x_{n+1} + x_{n+1}^2}{3} \right).$$

En remplaçant, dans cette relation, b et c par leurs valeurs :

$$\left\{ \begin{array}{l} b = \frac{2(M_n - M_{n-1})}{x_{n+2} - x_{n-1}} \frac{x_{n+2} + x_{n+1} + x_n}{x_{n+1} - x_{n-1}}, \\ \quad - \frac{2(M_{n+1} - M_n)}{x_{n+2} - x_{n-1}} \frac{x_{n+1} + x_n + x_{n-1}}{x_{n+2} - x_n}, \\ c = \frac{3(M_{n+1} - M_n)}{(x_{n+2} - x_n)(x_{n+2} - x_{n-1})} - \frac{3(M_n - M_{n-1})}{(x_{n+2} - x_{n-1})(x_{n+1} - x_{n-1})}, \end{array} \right.$$

on connaîtra Δ_n en fonction de M , x et X .

Les valeurs numériques des quantités M ont été données précédemment.

Les valeurs angulaires x correspondant au commencement de chaque mois s'obtiennent aisément, connaissant la valeur angulaire correspondant à l'intervalle d'un jour. Celle-ci, en admettant que l'année comprenne 365 jours est de :

$$\frac{360}{365} = 0^{\circ},9863 = 0,0172.$$

J'ai alors établi le tableau suivant :

$x_1 = 0,000$	$x_8 = 2,064$	$x_9 = 4,180$
$x_2 = 0,533$	$x_9 = 2,597$	$x_{10} = 4,696$
$x_3 = 1,015$	$x_7 = 3,113$	$x_{11} = 5,229$
$x_4 = 1,548$	$x_6 = 3,646$	$x_{12} = 5,745$

Enfin, j'ai choisi pour X les valeurs ci-dessous :

$X_1 = 0,262$	$X_5 = 2,356$	$X_9 = 4,451$
$X_2 = 0,785$	$X_6 = 2,880$	$X_{10} = 4,974$
$X_3 = 1,309$	$X_7 = 3,403$	$X_{11} = 5,498$
$X_4 = 1,833$	$X_8 = 3,927$	$X_{12} = 6,021$

qui correspondent au milieu des douze mois supposés égaux.

Avec ces données, j'ai calculé la valeur numérique de la correction Δ pour chacun des mois. J'ai obtenu ainsi les nombres suivants :

$\Delta_1 = -10$ cal.	$\Delta_5 = +12$ cal.	$\Delta_9 = -4$ cal.
$\Delta_2 = +2$	$\Delta_6 = +10$	$\Delta_{10} = -7$
$\Delta_3 = +17$	$\Delta_7 = +2$	$\Delta_{11} = -10$
$\Delta_4 = +19$	$\Delta_8 = +0$	$\Delta_{12} = -10$

Les valeurs de y à douze époques équidistantes correspondant au milieu des douze mois supposés égaux seront par suite :

$y_1 = 632$ cal.	$y_5 = 1,908$ cal.	$y_9 = 1,401$ cal.
$y_2 = 910$	$y_6 = 2,047$	$y_{10} = 1,023$
$y_3 = 1,300$	$y_7 = 1,977$	$y_{11} = 701$
$y_4 = 1,682$	$y_8 = 1,750$	$y_{12} = 554$

Ce sont ces nombres qui ont été utilisés pour tracer la courbe A (fig. 2), représentative de la variation annuelle de la quantité de chaleur qui parviendrait au sol, l'atmosphère étant supposée parfaitement transparente.

L'examen de cette courbe enseigne que, dans cette hypothèse, la chaleur qui parviendrait au sol dans le cours d'une année, éprouverait une oscillation simple avec un seul maximum et un seul minimum.

La courbe s'élève d'abord lentement à partir de janvier, plus rapidement en avril-mai, puis de moins en moins vite jusqu'à la fin de juin, où elle atteint son maximum. Le mouvement de baisse, peu marqué en juillet, s'accroît en septembre-octobre et se ralentit ensuite, progressivement jusqu'en janvier.

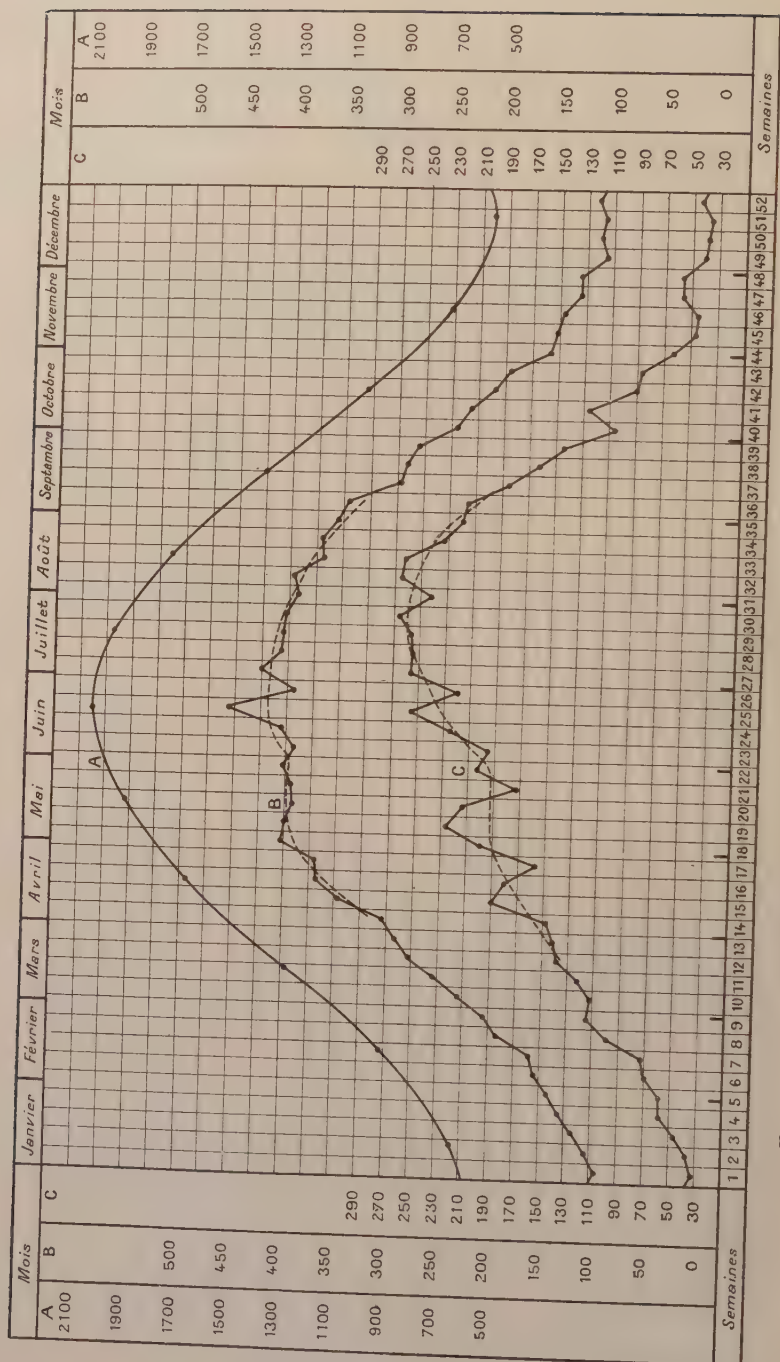


Fig. 2. — Variation annuelle de la quantité de chaleur reçue du Soleil par la Terre.

Les époques du maximum et du minimum déterminées sur cette courbe ne coïncident pas avec celles des solstices, mais se présentent un peu avant. On trouve :

Maximum	20 juin.
Minimum	19 décembre.

Ces petites différences avec les dates des solstices tiennent à la position du périégée et de l'apogée sur l'écliptique.

II. — Considérons maintenant le cas où l'atmosphère intervient et exerce son action sur la chaleur envoyée par le Soleil à la Terre, mais en supposant que le ciel reste constamment découvert.

Le procédé le plus rationnel pour étudier la variation annuelle de la chaleur reçue par le sol, consiste évidemment à calculer, au moyen de la série des observations faites de 1883 à 1901, la quantité moyenne de chaleur reçue chaque jour de l'année. Le problème revient à déterminer les 365 valeurs moyennes quotidiennes de l'intégrale

$$\frac{C}{r^2} \int_{-t_0}^{+t_1} (1+x)^{-p} \sin h \, dt.$$

dans laquelle les lettres ont une signification analogue à celle donnée plus haut.

Un tel calcul serait extrêmement long et pénible. Je me suis contenté de calculer 52 valeurs moyennes Q de cette intégrale correspondant aux 52 semaines, par un procédé identique à celui déjà employé.

Les tableaux suivants renferment les éléments nécessaires au calcul.

Valeurs hebdomadaires moyennes de la déclinaison δ
du soleil.

SEMAINES	δ	SEMAINES	δ	SEMAINES	δ	SEMAINES	δ
1	22°40'	14	6°16'	27	22°46'	40	4°32'
2	21,44	15	8,52	28	21,55	41	7,13
3	20,26	16	11,21	29	20,47	42	9,48
4	18,50	17	13,41	30	19,21	43	12,17
5	16,57	18	15,49	31	17,40	44	14,36
6	14,49	19	17,45	32	15,44	45	16,44
7	12,30	20	19,27	33	13,36	46	18,38
8	10,00	21	20,52	34	11,18	47	20,16
9	7,23	22	22,00	35	8,50	48	21,35
10	4,41	23	22,49	36	6,16	49	22,34
11	1,56	24	23,18	37	3,37	50	23,12
12	0,50	25	23,27	38	0,54	51	23,27
13	3,35	26	23,16	39	1,49	52	23,19

Valeurs hebdomadaires moyennes de l'angle horaire t_0
du soleil à son lever et à son coucher.

SEMAINES	t_0	SEMAINES	t_0	SEMAINES	t_0	SEMAINES	t_0
1	66°32'	14	96° 1'	27	113°36'	40	85°41'
2	67,39	15	98,33	28	112,32	41	83, 3
3	69,11	16	101, 3	29	111,14	42	80,31
4	71, 2	17	103,28	30	109,30	43	78,00
5	73, 6	18	105,39	31	107,42	44	75,36
6	75,22	19	107,45	32	105,35	45	73,20
7	77,51	20	109,39	33	103,20	46	71,30
8	80,21	21	111,17	34	100,59	47	69,24
9	82,53	22	112,31	35	99,00	48	67,49
10	85,31	23	113,39	36	96, 1	49	66,39
11	88, 8	24	114,15	37	93,27	50	65,52
12	89,11	25	114,26	38	89, 8	51	65,34
13	93,20	26	114,11	39	88,15	52	65,45

Valeurs horaires de $\sin h$ pour chaque semaine.

SEMAINES	5 HEURES	6 HEURES	7 HEURES	8 HEURES	9 HEURES	10 HEURES	11 HEURES	12 HEURES
1	"	"	"	0,069	0,207	0,313	0,380	0,403
2	"	"	"	0,081	0,220	0,327	0,394	0,417
3	"	"	"	0,098	0,238	0,346	0,414	0,437
4	"	"	"	0,121	0,263	0,372	0,441	0,464
5	"	"	"	0,145	0,288	0,398	0,467	0,491
6	"	"	0,005	0,174	0,319	0,430	0,500	0,524
7	"	"	0,034	0,205	0,351	0,463	0,534	0,558
8	"	"	0,065	0,237	0,384	0,497	0,569	0,593
9	"	"	0,097	0,270	0,418	0,532	0,604	0,628
10	"	"	0,131	0,305	0,454	0,569	0,641	0,666
11	"	"	0,164	0,339	0,488	0,603	0,675	0,700
12	"	0,010	0,197	0,372	0,522	0,637	0,709	0,734
13	"	0,043	0,230	0,405	0,554	0,669	0,741	0,766
14	"	0,075	0,261	0,435	0,584	0,699	0,771	0,795
15	"	0,106	0,291	0,463	0,611	0,725	0,797	0,821
16	"	0,136	0,320	0,491	0,638	0,751	0,822	0,846
17	"	0,163	0,345	0,515	0,660	0,772	0,842	0,866
18	0,008	0,188	0,368	0,536	0,680	0,791	0,860	0,884
19	0,031	0,210	0,389	0,555	0,698	0,808	0,876	0,900
20	0,053	0,230	0,407	0,572	0,713	0,821	0,890	0,914
21	0,071	0,246	0,421	0,585	0,725	0,832	0,900	0,923
22	0,085	0,259	0,433	0,595	0,733	0,840	0,907	0,930
23	0,095	0,268	0,441	0,602	0,740	0,846	0,913	0,936
24	0,101	0,273	0,445	0,606	0,743	0,849	0,915	0,938
25	0,103	0,275	0,447	0,607	0,744	0,850	0,916	0,939
26	0,101	0,273	0,445	0,606	0,743	0,849	0,915	0,938
27	0,094	0,267	0,440	0,601	0,739	0,845	0,912	0,935
28	0,084	0,258	0,432	0,594	0,732	0,839	0,906	0,929
29	0,070	0,245	0,420	0,584	0,724	0,831	0,899	0,922
30	0,052	0,229	0,406	0,571	0,712	0,820	0,889	0,912
31	0,031	0,210	0,389	0,555	0,698	0,808	0,876	0,900
32	0,006	0,187	0,368	0,536	0,680	0,791	0,860	0,884
33	"	0,162	0,344	0,514	0,660	0,772	0,842	0,866
34	"	0,135	0,319	0,490	0,637	0,750	0,821	0,845
35	"	0,106	0,291	0,463	0,611	0,725	0,797	0,821
36	"	0,075	0,261	0,435	0,584	0,699	0,771	0,795
37	"	0,043	0,230	0,405	0,554	0,669	0,741	0,766
38	"	0,010	0,197	0,372	0,522	0,637	0,709	0,734
39	"	"	0,165	0,340	0,489	0,604	0,676	0,701
40	"	"	0,132	0,306	0,455	0,570	0,642	0,667
41	"	"	0,099	0,272	0,421	0,535	0,607	0,631
42	"	"	0,068	0,240	0,387	0,500	0,572	0,596
43	"	"	0,036	0,207	0,353	0,465	0,536	0,560
44	"	"	0,008	0,177	0,322	0,433	0,503	0,527
45	"	"	"	0,143	0,287	0,397	0,466	0,490
46	"	"	"	0,123	0,265	0,374	0,443	0,466
47	"	"	"	0,101	0,241	0,349	0,417	0,440
48	"	"	"	0,083	0,222	0,329	0,396	0,419
49	"	"	"	0,070	0,208	0,314	0,381	0,404
50	"	"	"	0,061	0,198	0,304	0,370	0,393
51	"	"	"	0,057	0,194	0,300	0,366	0,389
52	"	"	"	0,060	0,197	0,303	0,369	0,392

Valeurs horaires de la masse atmosphérique $x = \frac{1}{\sin h}$
traversée, pour chaque semaine.

SEMAINES	5 HEURES	6 HEURES	7 HEURES	8 HEURES	9 HEURES	10 HEURES	11 HEURES	12 HEURES
1	»	»	»	14,49	4,83	3,19	2,63	2,48
2	»	»	»	12,35	4,55	3,06	2,54	2,42
3	»	»	»	10,20	4,20	2,89	2,42	2,28
4	»	»	»	8,26	3,80	2,69	2,27	2,15
5	»	»	»	6,90	3,47	2,51	2,14	2,04
6	»	»	200,00	5,75	3,13	2,33	2,00	1,91
7	»	»	29,41	4,88	2,85	2,16	1,87	1,79
8	»	»	15,38	4,22	2,60	2,01	1,76	1,69
9	»	»	10,31	3,70	2,39	1,88	1,66	1,59
10	»	»	7,63	3,28	2,20	1,76	1,56	1,50
11	»	»	6,10	2,95	2,05	1,66	1,48	1,43
12	»	100,00	5,08	2,69	1,92	1,57	1,41	1,36
13	»	23,26	4,35	2,47	1,81	1,49	1,35	1,31
14	»	13,33	3,83	2,30	1,71	1,43	1,30	1,26
15	»	9,43	3,44	2,16	1,64	1,38	1,25	1,22
16	»	7,35	3,12	2,04	1,57	1,33	1,22	1,18
17	»	6,13	2,90	1,94	1,52	1,29	1,19	1,15
18	125,00	5,32	2,72	1,87	1,47	1,26	1,16	1,13
19	32,26	4,76	2,57	1,80	1,43	1,24	1,14	1,11
20	18,87	4,35	2,45	1,75	1,40	1,22	1,12	1,09
21	14,09	4,07	2,38	1,71	1,38	1,20	1,11	1,08
22	11,76	3,86	2,31	1,68	1,36	1,19	1,10	1,07
23	10,53	3,73	2,27	1,66	1,35	1,18	1,10	1,07
24	9,90	3,66	2,25	1,65	1,35	1,18	1,09	1,07
25	9,71	3,64	2,24	1,65	1,34	1,18	1,09	1,06
26	9,90	3,66	2,25	1,65	1,35	1,18	1,09	1,07
27	10,64	3,75	2,27	1,66	1,35	1,18	1,10	1,08
28	11,90	3,88	2,31	1,67	1,37	1,19	1,10	1,08
29	14,29	4,08	2,38	1,71	1,38	1,20	1,11	1,08
30	19,23	4,37	2,46	1,75	1,40	1,22	1,12	1,10
31	32,26	4,76	2,57	1,80	1,43	1,24	1,14	1,11
32	166,67	5,35	2,72	1,87	1,47	1,26	1,16	1,13
33	»	6,17	2,91	1,95	1,52	1,29	1,19	1,15
34	»	7,40	3,14	2,04	1,57	1,33	1,22	1,18
35	»	9,43	3,44	2,16	1,64	1,38	1,25	1,22
36	»	13,33	3,83	2,30	1,71	1,43	1,30	1,26
37	»	23,26	4,35	2,47	1,81	1,49	1,35	1,31
38	»	100,00	5,08	2,69	1,92	1,57	1,41	1,36
39	»	»	6,06	2,94	2,04	1,66	1,48	1,43
40	»	»	7,57	3,27	2,20	1,75	1,56	1,49
41	»	»	10,19	3,67	2,38	1,87	1,65	1,58
42	»	»	14,71	4,16	2,58	2,00	1,75	1,68
43	»	»	27,78	4,83	2,83	2,15	1,87	1,79
44	»	»	125,00	5,65	3,11	2,31	1,99	1,90
45	»	»	»	6,99	3,48	2,52	2,14	2,04
46	»	»	»	8,13	3,77	2,67	2,26	2,14
47	»	»	»	9,90	4,10	2,87	2,40	2,27
48	»	»	»	12,05	4,50	3,04	2,53	2,39
49	»	»	»	14,29	4,80	3,19	2,62	2,48
50	»	»	»	16,39	5,05	3,29	2,70	2,54
51	»	»	»	17,54	5,15	3,33	2,73	2,57
52	»	»	»	16,67	5,08	3,30	2,71	2,55

Valeurs hebdomadaires moyennes de l'intensité calorifique q
de la radiation solaire.

SEMAINES	q	SEMAINES	q	SEMAINES	q	SEMAINES	q
	cal.		cal.		cal.		cal.
1	1,013	14	1,187	27	1,127	40	1,073
2	1,022	15	1,189	28	1,109	41	1,132
3	1,054	16	1,204	29	1,123	42	1,092
4	1,073	17	1,180	30	1,153	43	1,091
5	1,084	18	1,217	31	1,099	44	1,022
6	1,105	19	1,180	32	1,121	45	1,030
7	1,073	20	1,117	33	1,141	46	1,067
8	1,079	21	1,115	34	1,143	47	1,056
9	1,103	22	1,133	35	1,137	48	1,084
10	1,123	23	1,069	36	1,174	49	0,987
11	1,133	24	1,078	37	1,069	50	1,049
12	1,142	25	1,200	38	1,118	51	1,019
13	1,126	26	1,116	39	1,119	52	1,024

Valeurs hebdomadaires moyennes de $\log r^2$.

SEMAINES	$\log r^2$	SEMAINES	$\log r^2$	SEMAINES	$\log r^2$	SEMAINES	$\log r^2$
1	1,98533	14	0,00085	27	0,01446	40	1,99983
2	1,98554	15	0,00258	28	0,01429	41	1,99805
3	1,98592	16	0,00424	29	0,01389	42	1,99630
4	1,98652	17	0,00586	30	0,01335	43	1,99465
5	1,98737	18	0,00743	31	0,01265	44	1,99306
6	1,98841	19	0,00887	32	0,01172	45	1,99153
7	1,98957	20	0,01013	33	0,01060	46	1,99010
8	1,99088	21	0,01126	34	0,00937	47	1,98888
9	1,99236	22	0,01228	35	0,00803	48	1,98782
10	1,99397	23	0,01312	36	0,00654	49	1,98690
11	1,99562	24	0,01372	37	0,00492	50	1,98615
12	1,99730	25	0,01413	38	0,00325	51	1,98566
13	1,99905	26	0,01439	39	0,00157	52	1,98540

Valeurs moyennes de p pour chaque semaine.

SEMAINES	p	SEMAINES	p	SEMAINES	p	SEMAINES	p
1	1,13	14	1,49	27	1,68	40	1,44
2	1,14	15	1,51	28	1,71	41	1,34
3	1,15	16	1,53	29	1,69	42	1,33
4	1,17	17	1,58	30	1,64	43	1,28
5	1,20	18	1,55	31	1,69	44	1,30
6	1,23	19	1,61	32	1,65	45	1,24
7	1,31	20	1,70	33	1,66	46	1,17
8	1,35	21	1,71	34	1,58	47	1,15
9	1,37	22	1,69	35	1,55	48	1,09
10	1,40	23	1,77	36	1,48	49	1,15
11	1,43	24	1,76	37	1,56	50	1,08
12	1,47	25	1,62	38	1,48	51	1,10
13	1,52	26	1,78	39	1,43	52	1,01

Avec les données numériques contenues dans les tableaux précédents, j'ai déterminé, pour chaque semaine, les valeurs horaires moyennes de l'expression :

$$\frac{C}{r^2} (1+x)^{-p} \sin h.$$

J'ai construit ensuite les courbes ayant pour abscisses les temps, depuis le moment du lever du Soleil jusqu'à celui de son coucher, et pour ordonnées les valeurs ainsi calculées.

J'ai obtenu 52 courbes, dont les aires représentent des quantités proportionnelles aux quantités de chaleur qui parviendraient, en moyenne, au sol, pendant un jour de chaque semaine, en supposant le ciel sans nébulosité apparente.

Pour transformer ces nombres en calories, il suffit de multiplier les aires mesurées, par le facteur de réduction. Les courbes ayant été tracées à la même échelle que précédemment, ce facteur conserve la même valeur : 0,12.

Les quantités de chaleur ainsi calculées sont consignées dans le tableau suivant :

Tableau des valeurs hebdomadaires moyennes de Q.

SEMAINES	Q	SEMAINES	Q	SEMAINES	Q	SEMAINES	Q
	cal.		cal.		cal.		cal.
1	98	14	311	27	425	40	241
2	101	15	349	28	443	41	235
3	117	16	364	29	411	42	219
4	130	17	372	30	407	43	199
5	141	18	406	31	382	44	166
6	154	19	401	32	398	45	151
7	161	20	396	33	371	46	149
8	190	21	398	34	374	47	133
9	211	22	403	35	359	48	134
10	230	23	383	36	348	49	111
11	260	24	413	37	293	50	117
12	275	25	464	38	290	51	113
13	283	26	385	39	278	52	119

La courbe B (fig. 2), a été tracée à l'aide des nombres ci-dessus. Elle représente, par conséquent, la variation annuelle de la quantité de chaleur qui parviendrait au sol, si le Soleil n'était jamais caché par les nuages.

A partir d'un minimum qui se présente dans la première semaine de janvier, un peu en retard sur l'époque du solstice d'hiver, la courbe monte d'abord assez régulièrement jusqu'au début du mois de mai, reste à peu près en « plateau » jusque vers le milieu de juin, puis s'élève brusquement et décroît aussitôt après, non moins rapidement, accusant une brusque poussée de chaleur qui constitue le maximum annuel, au voisinage du solstice d'été. La courbe descend ensuite, en offrant quelques sinuosités, jusqu'au minimum.

Ce palier de la courbe, au mois de mai, peut s'expliquer de la façon suivante :

A mesure que la durée du jour augmente, l'atmosphère se charge de quantités croissantes de vapeur d'eau. Celle-ci émigre peu à peu vers les hautes régions, où elle finit par se condenser. La réflexion et la diffusion du rayonnement solaire par cette nappe de condensation arrive à compenser l'accroissement de chaleur qui proviendrait de l'augmentation de hauteur du Soleil. Mais la chaleur de l'été ne tarde pas à dissoudre la vapeur condensée, l'atmosphère reprend sa transparence et la chaleur reçue augmente jusqu'à son maximum.

La « courbe régularisée » tracée en pointillé fait ressortir, à première vue, le caractère général de cette portion de la courbe.

III. — Examinons enfin la marche annuelle de la quantité de chaleur réellement reçue à la surface du sol.

En réalité, la radiation est intermittente; les plus légers nuages, les moindres accidents atmosphériques, suffisent pour lui faire éprouver les fluctuations les plus grandes de moment en moment, et, chaque fois que le Soleil est voilé par un nuage, la radiation tombe dans le voisinage de zéro, un actinographe trace une droite presque mathématique. Or, ces interruptions se produisant plusieurs fois par jour et à une heure quelconque, on peut admettre que l'on obtient la quantité de chaleur réellement reçue pendant un jour à la surface du sol (tout au moins au degré d'approximation réalisable dans l'état de la question), en multipliant la quantité calculée dans l'hypothèse où le Soleil n'est pas couvert de nuages, par la *fraction d'insolation*, c'est-à-dire par le rapport des durées de l'insolation réelle à l'insolation théorique.

Cette méthode est justifiée par les nombres suivants, déduits des observations faites à Kieff en 1890, par M. Savé-lief (1).

(1) *Annales de Ch. et Phys.*, 6^e série, t. XXVI, 1892.

SEMAINES	FRACTION d'insolation	SEMAINES	FRACTION d'insolation	SEMAINES	FRACTION d'insolation	SEMAINES	FRACTION d'insolation
1	0,33	14	0,48	27	0,60	40	0,44
2	0,38	15	0,55	28	0,61	41	0,55
3	0,41	16	0,50	29	0,62	42	0,51
4	0,44	17	0,42	30	0,66	43	0,43
5	0,41	18	0,49	31	0,63	44	0,37
6	0,46	19	0,57	32	0,67	45	0,32
7	0,45	20	0,54	33	0,71	46	0,32
8	0,52	21	0,43	34	0,62	47	0,42
9	0,54	22	0,51	35	0,61	48	0,42
10	0,47	23	0,51	36	0,62	49	0,36
11	0,48	24	0,55	37	0,62	50	0,34
12	0,50	25	0,55	38	0,56	51	0,32
13	0,51	26	0,57	39	0,52	52	0,39

Les valeurs des quantités moyennes de chaleur q parvenant réellement à la surface du sol pendant un jour de chaque semaine, s'obtiendront en multipliant par les nombres ci-dessus, les valeurs correspondantes calculées précédemment, pour chaque semaine, dans l'hypothèse d'un ciel constamment pur. On forme ainsi le tableau suivant :

SEMAINES	Q	SEMAINES	Q	SEMAINES	Q	SEMAINES	Q
	cal		cal.		cal.		cal.
1	32	14	149	27	255	40	106
2	38	15	192	28	252	41	129
3	48	16	182	29	255	42	90
4	57	17	156	30	269	43	85
5	58	18	199	31	240	44	62
6	71	19	229	32	267	45	48
7	73	20	214	33	263	46	48
8	99	21	171	34	232	47	56
9	114	22	206	35	219	48	56
10	108	23	195	36	216	49	40
11	125	24	227	37	185	50	40
12	138	25	235	38	163	51	36
13	145	26	219	39	145	52	46

La courbe C (fig. 2) est la représentation graphique des nombres contenus dans ce tableau. Elle offre des sinuosités nombreuses et accentuées; le minimum se produit dans la première semaine de janvier et le maximum à la fin de juillet; enfin, elle présente, au mois de mai, un palier, bien apparent sur la courbe moyenne tracée en pointillé.

III

ÉVALUATION DE LA QUANTITÉ DE CHALEUR REÇUE PAR LE SOL PENDANT LE COURANT DE L'ANNÉE

Quel est l'apport *moyen* annuel de la radiation calorifique du Soleil à la latitude de Montpellier?

1° La quantité de chaleur qui serait reçue annuellement sur 1 centimètre carré du sol horizontal, l'atmosphère étant supposée parfaitement transparente, s'obtient en évaluant l'aire limitée par la courbe A. et en transformant ensuite, en calories, le nombre correspondant.

On trouve :

Première moitié de l'année.	257.770 cal.
Deuxième moitié de l'année	<u>230.160</u>
Année.	487.930 cal.

Les deux moitiés de l'année se partageraient inégalement

l'apport calorifique solaire, et la différence 27.610 calories serait en faveur de la première partie.

2° Pour obtenir la quantité de chaleur qui parviendrait au sol dans l'hypothèse d'un ciel constamment découvert, sans nébulosité apparente, il suffit de multiplier par 7 les nombres (1) contenus dans le tableau de la page 53 (puisque chacun d'eux représente, pour chaque semaine, l'apport moyen d'un jour) et de faire le total.

On est ainsi conduit au nombre de 99.800 calories, qui se répartissent de la façon suivante entre les deux moitiés de l'année :

Première moitié de l'année	51.780 cal.
Deuxième moitié de l'année	48.020
Différence.	3.760 cal.

Les six premiers mois profiteraient donc d'un excédent voisin de 4.000 calories.

On trouve de même que l'apport moyen calorifique pour chaque saison serait de :

Hiver (décembre, janvier, février)	41.815 cal.
Printemps (mars, avril, mai).	29.357
Été (juin, juillet, août)	36.652
Automne (septembre, octobre, novembre).	21.976

3° En procédant d'une façon identique avec le nombre du tableau de la page 56, on trouve pour la quantité de chaleur réellement reçue :

Première moitié de l'année	25.897 cal.
Deuxième moitié de l'année	26.668
Total	52.565 cal.

On remarque que c'est la seconde moitié de l'année (et non pas la première, comme cela arriverait si le Soleil restait constamment découvert, ou si l'atmosphère n'exerçait aucune action) qui bénéficie d'un excédent de calories.

(1) Sauf le dernier qu'il faut multiplier par 8, parce que l'intervalle correspondant comprend 8 jours.

La différence est de $26.668 - 25.897 = 770$ calories.

Quant à la répartition saisonnière, elle s'effectue de la manière suivante :

Hiver (décembre, janvier, février)	4.545 cal.
Printemps (mars, avril, mai)	14.970
Été (juin, juillet, août)	21.822
Automne (septembre, octobre, novembre)	11.228

Il n'est pas sans intérêt de comparer parallèlement ces chiffres aux températures moyennes de chaque saison indiquées ci-dessous :

Hiver.	6°,8	Été.	22°,6
Printemps	13°,4	Automne	15°,2

On voit que *l'automne bénéficie d'une température moyenne supérieure de 2° environ à celle du printemps, bien qu'il reçoive une moins grande somme de chaleur.*

Ce simple fait suffit pour montrer l'importance climatologique que présente la détermination, même approchée, des quantités de chaleur reçues par le sol.

On se fera une idée plus nette de la grandeur de ces diverses sommes de chaleur en les représentant par quelques effets physiques qu'elles seraient capables de produire, tels, par exemple, que la fusion d'une certaine épaisseur de glace ou encore la combustion d'une couche de houille.

On sait que, pour fondre 1 centimètre cube de glace à 0°, il faut :

$$80 \times 0,918 = 73,44 \text{ cal.}$$

80 étant la chaleur de fusion de la glace, et 0,918 son poids spécifique.

De même, si l'on admet que 1 gramme de houille dégage en brûlant 8.000 calories, la combustion de 1 centimètre cube de houille dégagera :

$$8.000 \times 1,3 = 10.400 \text{ cal.,}$$

1,3 étant la densité de la houille.

L'équivalent de la chaleur solaire en glace fondue ou en houille brûlée s'obtiendra en divisant sa valeur numérique, successivement, par 73,44 et 10.400.

On forme ainsi le tableau suivant, où les épaisseurs sont exprimées en centimètres :

	ÉPAISSEUR de glace fondue	ÉPAISSEUR de houille brûlée
Hiver	61,9	0.437
Printemps.	203,8	1.439
Été	297,1	2,098
Automne	152,8	1,079
Année.	715,6	5,053

RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS

En résumé, pour la région de Montpellier :

1° La quantité de chaleur que la surface de la Terre reçoit du Soleil présente une variation dont la période est sensiblement égale à celle de la variation de l'activité solaire évaluée par le nombre des taches des facules ou des protubérances. Les courbes figuratives des deux phénomènes sont analogues, mais inverses; elles seraient vraisemblablement concordantes si l'évaporation à la surface du globe n'apportait son action perturbatrice.

2° Si le passage du rayonnement solaire à travers notre atmosphère ne lui faisait éprouver aucune perte, par absorption et par diffusion, la quantité de chaleur reçue en un jour, à la surface du sol, éprouverait dans le cours de l'année une oscillation unique régulière dont le maximum et le minimum se produiraient un peu avant les époques des solstices. Les deux moitiés de l'année se partageraient inégalement l'apport colorifique solaire, la différence étant en faveur de la première.

3° L'atmosphère intervient pour altérer la régularité de cette variation en réduisant les quantités de chaleur que nous envoie le soleil, non seulement dans leurs valeurs absolues mais encore dans leurs rapports entre elles.

Si le soleil n'était jamais caché par les nuages, la courbe

de la variation annuelle de la chaleur reçue serait encore assez régulière dans son ensemble, malgré quelques saillies dont une, véritable « pic de chaleur », marque le maximum de l'année. Le minimum et le maximum se présenteraient, comme précédemment, à des dates très voisines de celles des solstices. La quantité de chaleur qui tomberait à la surface du sol durant la première moitié de l'année serait également supérieure à celle qui lui parviendrait pendant la seconde moitié.

La courbe figurative de la variation annuelle de la chaleur qui parvient réellement au sol présente de nombreuses dents qui lui donnent un aspect tourmenté. Le minimum se produit encore à la même date que précédemment, mais le maximum éprouve un « décalage » qui le refoule à la fin de juillet, le faisant ainsi retarder d'un mois sur le solstice d'été. Les deux moitiés de l'année reçoivent, à peu de chose près, la même quantité de chaleur avec un léger avantage, en faveur, cette fois, de la seconde partie.

Ces résultats déduits, en fait, de l'étude approfondie d'une série unique d'observations effectuées en une seule station et réparties sur un laps de temps relativement court, montrent nettement tout ce que l'on pourrait tirer d'observations actinométriques poursuivies d'une manière régulière et continue dans des stations différentes.

On connaîtrait ainsi les quantités diurnes, mensuelles et annuelles d'énergie solaire reçues en divers points du globe, ce qui permettrait de caractériser les climats bien mieux qu'on ne peut le faire au moyen des seules observations météorologiques relevées couramment dans les diverses stations.

La discussion de ces données conduirait, sans nul doute, à des conclusions d'un grand intérêt, tant pour la physique du globe que pour l'astronomie solaire.

Au cours de ces recherches, j'ai reçu de précieux conseils de l'éminent professeur M. J. Violle, membre de l'Institut. Je suis heureux de lui en témoigner ici ma bien sincère gratitude.

J'exprime mes remerciements à M. C. Flammarion pour la sympathie qu'il me témoigne et pour les facilités que j'ai trouvées à l'Observatoire de Juvisy.

Je remercie aussi M. G. Eiffel pour l'intérêt qu'il a porté à la réalisation de ce travail.

SECONDE THÈSE

PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ

LES GAZ DE L'AIR

— Vu et approuvé :

PARIS, LE 30 JANVIER 1908.

Le Doyen de la Faculté des Sciences,

PAUL APPELL.

Vu et permis d'imprimer :

PARIS, LE 30 JANVIER 1908.

Le Vice-Recteur de l'Académie de Paris,

L. LIARD.

